中国战略性新兴产业研究与发展

R&D of China's Strategic New Industries

功能材料

Wind Energy

国家仪表功能材料工程技术研究中心 组编
刘庆宾 主编

机械工业出版社
China Machine Press

刘庆宾　1967年5月生，教授级高工，现任重庆材料研究院有限公司（简称重材院）董事长兼总经理、国家仪表功能材料工程技术研究中心主任，兼任中国仪表功能材料学会常务副理事长、中国仪表功能材料行业协会理事长、全国仪表功能材料标准化技术委员会（TC419）主任。

刘庆宾教授是重材院贵金属材料创新团队首席专家，享受国务院政府特殊津贴，曾荣获“全国优秀科技工作者”称号。先后承担国家科技支撑计划、院所专项资金等重点项目十余项，开发的多种功能材料已广泛应用于我国冶金、石化、能源、航空航天以及国防军工众多领域，并制定了一系列的国家标准、国家军用标准和国家计量检定规范，获得多项国家级和省部级科技进步奖励。

中国战略性新兴产业研究与发展

功能材料

重庆材料研究院有限公司
中国仪器仪表学会仪表功能材料分会　　组编
中国仪器仪表行业协会仪表功能材料分会

刘庆宾　主编

机械工业出版社
China Machine Press

本书分 8 篇，主要对功能材料行业的 6 类子材料的行业发展现状、科技发展状况、国内外情况对比、资源潜力、布局与思路、发展目标、发展战略、面临的机遇等进行了全面、系统的分析研究，对功能材料的未来发展提出了具有指导意义的建议。其中，第 1 篇是功能材料的概述，从全局的高度分析并比较了国内外功能材料行业的发展现状、特点、技术水平与发展趋势；第 2 ～ 7 篇则分别分析了纳米功能材料、3D 打印材料、电磁流变材料、生物功能材料、土木功能材料、新能源材料 6 个子行业的发展现状，并提出今后的发展目标与布局规划；附录篇着重对功能材料所用的钒、钛、碲、铋四类资源进行了现状与潜力分析。

本书资料详实，具有一定的思想、理论深度，适合各级政府和行业决策机构制定政策法规、学术研究机构规划研究方向参考，也适合企业决策者，技术、管理及市场人员，以及投资、证券行业及咨询机构的人员在规划、投资、研究、项目实施中使用。

图书在版编目（CIP）数据

中国战略性新兴产业研究与发展．功能材料 / 刘庆宾主编；重庆材料研究院有限公司，中国仪器仪表学会仪表功能材料分会，中国仪器仪表行业协会仪表功能材料分会组编．—北京：机械工业出版社，2016.3
ISBN 978-7-111-53265-1

Ⅰ．①中… Ⅱ．①刘… ②重…③中… ④中… Ⅲ．①新兴产业－产业发展－研究－中国②功能材料－材料工业－产业发展－研究－中国 Ⅳ．①F121.3 ②F426

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 071694 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
责任编辑：董　蕾　　责任校对：舒　莹　赵　蕊
北京宝昌彩色印刷有限公司印制
2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
170mm×242mm ·28.75 印张 · 533 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-53265-1
定价：150.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社 服 务 中 心 :(010)88361066	年 鉴 网 :http://www.cmiy.com
销 售 一 部 :(010)68326294	机工官网 :http://www.cmpbook.com
销 售 二 部 :(010)88379649	机工官博 :http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线:(010)68326643	**封面无机械工业出版社专用防伪标均为盗版**

《中国战略性新兴产业研究与发展》

编委会

主　任　路甬祥　第十届、十一届全国人大常委会副委员长，中国科学院院士、中国工程院院士

副主任　苏　波　中纪委驻中央统战部纪检组组长

王文斌　中国机械工业联合会副会长、机械工业信息研究院院长、机械工业出版社社长

委　员　（按姓氏笔画排序）

石　勇　机械工业信息研究院副院长

冯金尧　中国机械通用零部件工业协会紧固件分会会长

邢　敏　中国内燃机工业协会常务副会长兼秘书长

刘庆宾　重庆材料研究院有限公司董事长兼总经理、中国仪器仪表行业协会仪表功能材料分会事事长

孙容磊　华中科技大学教授、中国人工智能学会智能制造专业委员会秘书长

吴正元　南京聚隆股份有限公司董事

张建成　兰州长城电工股份有限公司副总经理、总工程师

陆大明　中国机械工程学会物流工程分会理事长、北京起重运输机械设计研究院名誉院长

武兵书　中国模具工业协会常务副会长兼秘书长

赵志明　中国石油和石油化工设备工业协会首席顾问

徐东华　国资委机械工业经济管理研究院院长、国务院发展研究中心研究员

郭　锐　机械工业信息研究院副院长、机械工业出版社总编辑

蒋善武　天安电气集团有限公司总裁

景晓波　工业和信息化部运行监测协调局副巡视员

谢三明　工业和信息化部运行监测协调局监测预测处处长

樊高定　中国制冷空调工业协会常务副理事长

瞿金平　华南理工大学教授、中国工程院院士

《中国战略性新兴产业研究与发展·功能材料》

编委会

主　　编　刘庆宾

副 主 编（排名不分先后）

郭新立　方庆红　韩宝国　李美成

聂尊誉　王中林　杨绍利　张十庆

撰 稿 人（排名不分先后）

陈　坚　戴采云　丁思齐　董素芬　段宣明

方庆红　葛　创　郭新立　韩宝国　郝　威

康海澜　李　琦　李美成　龙剑平　马　兰

聂尊誉　孙胜伟　谭　军　王林志　王小娟

王云洋　杨绍利　杨晓亮　张　平　张　耀

张弘毅　张立卿　张十庆　赵　丽　赵安中

朱圣青　朱昭旺

《中国战略性新兴产业研究与发展》

编委会办公室

主　　任　石　勇（兼）

副 主 任　李卫玲

成　　员　刘世博　任智惠　董　蕾　李　晶

序言

全球金融危机和经济衰退发生以来，美欧日俄等各国为应对危机、复苏经济、抢占未来发展的先机和制高点，都在重新审视发展战略，不断加快推进“再工业化”，培育发展以新能源、节能环保低碳、生物医药、新材料与高端制造、新一代信息网络、智能电网、海洋空天等技术为支撑的战略性新兴产业，在全球范围内构建以战略性新兴产业为主导的新产业体系。力图通过新一轮的技术革命引领，重新回归实体经济，创造新的经济增长点。这已成为很多国家摆脱危机、实现增长、提升综合国力的根本出路。可以预计，未来的二三十年将是世界大创新、大变革、大调整的历史时期，人类将进入一个以绿色、智能、可持续发展为特征的知识文明时代。那些更多掌握绿色、智能技术，主导战略性新兴产业发展方向的国家和民族将在未来全球竞争合作中占据主导地位，赢得全球竞争合作，共享持续繁荣进程中的主动权和优势地位。

为应对金融危机和全球性经济衰退以及日趋强化的能源、资源和生态环境约束，以实现中国经济社会的科学发展、和谐发展、持续发展，党中央、国务院提出加快调整产业结构、转变经济发展方式，加快培育和促进战略性新兴产业发展的方针，出台了《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》以及相关政策举措。可以肯定，未来 5 ～ 10 年将是我国结构调整与改革创新发展的一个新的战略机遇期，将通过继续深化改革，扩大开放，提升自主创新能力，建设创新型国家，实现我国科技、产业、经济由大变强的历史性跨越，我国经济社会发展将走出一条依靠创新驱动，绿色智能，科学发展、和谐发展、持续发展之路，实现中华民族的伟大复兴。

展望未来，高端装备制造、新能源汽车、节能环保、新一代信息技术、生物医药、新能源、新材料、绿色运载工具、海洋空天、公共安全等全球战略性新兴产业将形成十数万亿美元规模的宏大产业，成为发展速度最快，采用高新技术最为密集，最具持续增长潜力的产业群落。战略性

新兴产业的发展需求也将拉动技术的创新突破和产业的结构调整，为包括我国在内的全球经济发展注入新的强大动力。

在世界各国高度重视培育和发展战略性新兴产业的新形势下，编著一套《中国战略性新兴产业研究与发展》图书，借鉴国外相关产业发展的成功经验，对行业发展思路、发展目标、发展战略、发展重点、投资方向、政策建议等方面进行全面、系统研究，凝聚对战略性新兴产业内涵和发展重点的认识，为国家战略性新兴产业发展规划的顺利实施，以及政府和有关部门制定促进战略性新兴产业发展的相关政策和法规提供参考，具有十分重要的现实意义。

《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书对相应产业的阐述、分析均注重强调战略性新兴产业的六个主要特点：

一是**绿色**。战略性新兴产业属于能耗低、排放少、零部件可再生循环的“环保型”“绿色型”产业，无论从产品的设计、制造、使用，还是回收、再利用等整个生命周期的各个环节，对资源的利用效率与对环境的承载压力均要求达到最理想水平。

二是**智能**。新型工业化要求坚持以信息化带动工业化、以工业化促进信息化，即要实现“两化融合”。而“两化融合”决定了智能是未来产业尤其是战略性新兴产业的发展方向。所谓智能，是指制造过程的智能化、产品本身的智能化、服务方式的智能化。这些均是智能的最基本层次，它还具有其他更为丰富的内涵。如：智能电网，通过先进的传感和测量技术、先进的设备技术、先进的控制方法以及先进的决策支持系统技术的应用，可实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和系统安全等方面的智能；智能汽车不只是安全智能，还包括节能、减排、故障预警等方面的智能。

三是**全球制造**。随着全球化趋势不断深化，战略性新兴产业的发展成果也必将是由全人类共创共享。新产品的研制开发，不再由一个企业独自完成，需要集成各方面优势资源共同解决。例如 iPhone 在中国完成装配，但它的设计、研发以及许多零部件的供应都是在美国、日本、欧洲等国实现的，其本身就是一个全球化的产品。因而，未来的制造必

然是全球化制造、网络化制造。

四是**满足个性化需求与为更多人分享相结合**。目前中国有 13 亿人口，印度有 12 亿人口，还有巴西、印度尼西亚等新兴国家、发展中国家也都要实现现代化。在全球如此规模庞大的人群中，既存在富裕阶层、高消费阶层，他们的消费需求是个性化、多样化的；又有占比较大的中产阶层、贫困人口，他们的消费需求是基本层次的，但也不能被忽视。两种类型的消费需求必须同时被满足，这不仅是构建和谐社会的需要，而且是构建和谐世界的需要。因此，我国发展战略性新兴产业，应该既要满足中高端个性化的需求，同时又要满足我国与其他发展中国家广大普通消费者的需求。要把个性化的设计、个性化的产品生产，与规模化、工业化的传统生产结合起来，不能完全抛弃传统的规模化生产方式。

五是**可持续**。要使有限的自然资源得以有效、可持续利用，发展利用可再生资源、能源，强调发展再制造、循环经济。无论是原材料使用，还是零部件制造，从研发、设计之初就考虑到了生产中的废料、使用后的遗骸的回收处置，使其能够重新得到循环利用。

六是**增值服务**。培育发展战略性新兴产业需要注意在设计制造过程中与产品售后、使用过程中提供相关增值服务。不应再局限于传统的观念，只注重制造本身，而不注重服务的价值。例如，发展电动汽车产业，必须首先解决好商业模式问题，包括充电桩建设、电池更换、废旧电池回收等服务方面，否则将无法广泛推广。

《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书内容丰富，资料翔实，观点鲜明，立意高远，并力求充分体现出“四性”，即科学性、前瞻性、指导性和基础性。

第一，体现**科学性**。所谓科学性，就是指以科学发展观为指导。科学发展观的核心是以人为本，总体目标是全面、协调、可持续，基本方法是统筹兼顾，符合客观规律。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书既要能够为党中央、国务院提出的加快发展战略性新兴产业的总体战略服务，又不应受到行业、部门的局限，更不能写成规划或某些部门规划的解读材料，而应能够立足于事物客观规律、立足于全局。各分

册编写组同志重视调查、研究，力求对国情、科技、产业及全球相关产业的发展态势有比较准确的把握，努力为我国战略性新兴产业的发展提供一本基于科学基础的好素材。这套图书立足基于我国国情，而不是简单地把发达国家的相关产业信息进行综合、编译，照搬照抄。当然，我国发展战略性新兴产业不能“闭门造车”，而是要坚持开放性，积极参与国际分工合作，充分利用全球优势资源，提高发展的起点和水平。因而，有必要参照国际成功经验与最新发展趋势，但一定要以我国国情和产业特点为根本出发点，加快培育和发展有中国特色的、竞争能力强的战略性新兴产业。

第二，体现**前瞻性**。一是能够前瞻战略性新兴产业的发展，因为这套图书是战略性新兴产业的发展指导书。二是能够前瞻战略性新兴产业技术的发展。为了做好这两个前瞻，必须要适当地前瞻全球经济、我国经济与战略性新兴产业发展的趋势。只讲发展现状是不够的，因为关于现状的资料很多，通过简单地网络搜索即可查到；也不能只罗列国外的某些规划和发展战略。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书的编写注重有深度的科学分析与前瞻性的研究。

第三，体现**指导性**。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书本身就是指导书，能够对产业、对技术、对国家制定政策，甚至在未来国家发展战略与规划的制定等方面发挥一定的引导作用与影响。虽然不能说这套图书可以指导国家战略与规划的制定，但是应该努力发挥其积极的引导作用。

第四，体现**基础性**。所谓基础性，就是指要能够提供战略性新兴产业的基础信息、基础知识，以及我国和有关国家在相关产业发展方面的基本战略，主要的法规、政策和举措，并尽可能提供一些基本的技术路线图。比如在轴承分册，就描述了一个轴承产业发展的路线图。唯有如此，《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书才能满足原来立项的宗旨 —— 不仅要为工程技术界、大学教师、大学生与研究生提供学习参考书，为产业界的技术人员、管理人员提供决策参照，而且要为政府部门的政策法规制定者提供参考。

机械工业出版社是具有60年历史的专业性综合型出版机构，改革开放后，随着市场经济的发展，机械工业出版社不断改革转型，不但形成了完善的编辑出版工作流程和质量保证体系，而且编辑人员作风严谨，工作创新。

《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书不仅是一套科技普及书，更是一套产业发展参考书，必须既要介绍国内外战略性新兴产业的发展情况，又要阐述相关政策、法规、扶植措施等内容。因此，这套图书的组编单位、编写负责人和编写工作人员必须要有相关积累和优势。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书所选的分册主编和作者主要是精力充沛的业内中青年专家，并由资深专家负责相应的编审、校审工作。现在看来大多数工作由中青年同志担当，是完全符合实际的。此外，这套图书的编著还充分发挥了有关科研院所、行业学会和协会的作用，他们的优势在于对行业比较熟悉，并掌握了较为丰富的资料。

最后，特别感谢国家出版基金对《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书的大力支持！感谢全体编写出版人员的辛勤劳动！

期望《中国战略性新兴产业研究与发展》为社会各界了解战略性新兴产业提供帮助，期待中国战略性新兴产业培育和发展尽快取得重大突破，祝愿我国在不久的将来实现由经济大国向经济强国的历史性跨越！

是为序。

2012年2月6日于北京

前言

功能材料是21世纪具有决定性意义的高新技术的集中体现，它是国家战略性新兴产业的基础与先导，对高新技术的发展起到极为重要的支撑与推动作用。功能材料不仅是发展我国信息技术、生物技术、能源技术等高新技术和国防建设的重要基础材料，而且是改造与提升我国基础工业和传统产业的基石、先导与依托，其研发与产业化水平直接影响我国装备制造的技术水平和资源、环境及社会的可持续发展。

《新材料产业“十二五”规划》中提出，材料工业是国民经济的基础产业，新材料是材料工业发展的先导，是重要的战略性新兴产业，而功能材料占材料工业的80%以上。因此，“十二五”甚至“十三五”时期皆是我国功能材料科技与产业由大变强的关键时期。加快培育和发展功能材料科技与产业，对于引领材料工业升级换代，支撑战略性新兴产业发展，保障国家重大工程建设，促进传统产业转型升级，构建国际竞争新优势具有重要的战略意义。

经过几十年发展，我国功能材料科技与产业不断发展壮大，功能材料科技与产业体系初步形成。我国功能材料研发和应用始于国防科技工业领域，经过多年发展，功能材料在国民经济各领域的应用不断扩大，初步形成了包括研发、设计、生产和应用，品种门类较为齐全的科技与产业体系。

2014年国外关于材料的重大战略规划也陆续出台，其中欧盟、日本、俄罗斯、美国在纳米材料、生物材料、智能材料、新能源材料等方面都予以高度重视。鉴于功能材料自身种类繁多的特点，第2篇到第7篇分别从纳米功能材料、3D打印材料、电磁流变材料、生物功能材料、土木工程用功能材料、新能源材料六大产业类进行详细阐述，同时根

据应用领域不同进行更为详细的定义和分类。其内容主要是剖析国内外科技与产业发展状况，探讨目前我国功能材料科技与产业发展存在的问题，并研究现行的相关产业政策、未来规划等，结合我国产业状况、优势和国外技术发展前沿，提出发展方向、发展策略等。附录阐述了我国功能材料用钒、钛、碲、铋资源开发现状及潜力分析。

本书编写力求内容丰富、资料翔实、指导性强，可为政府、行业合理规划及统筹布局战略性新兴产业提供相关建议，为企业投资提供指导性建议，对从事功能材料研究、开发、生产的科技工作者也有很好的参考价值。本书的顺利出版得到了中国仪表功能材料学会、中国仪表功能材料行业协会的大力支持，特别感谢东南大学郭新立教授团队主编了“纳米功能材料”部分，中国科学院重庆绿色智能技术研究院段宣明教授、王林志主编了“3D 打印材料”部分，重庆材料研究院张平教授主编了“电磁流变材料”部分，沈阳化工大学方庆红教授团队主编了“生物功能材料”部分，大连理工大学韩宝国教授、董素芬主编了“土木工程功能材料”部分，华北电力大学李美成教授团队主编了“新能源材料”部分，四川省攀枝花学院钒钛中心杨绍利教授团队主编了“我国钒、钛、碲、铋战略资源潜力分析”部分。

2016 年 3 月 6 日

编写说明

《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》确定了我国未来经济社会发展的战略重点和方向是战略性新兴产业，并且根据我国国情和科技、产业基础，又制定出现阶段重点发展节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车七大新兴产业。可见，未来几年七大战略性新兴产业将是国家重点支持、大力推广的产业。

为了使大家全面理解、准确把握、深刻领会国家这一战略决定的精神实质，了解其发展内涵，推动产业结构升级和经济发展方式转变，增强国际竞争优势，抢占新一轮经济和科技制高点，机械工业出版社在国家出版基金的支持下，组织各领域权威专家编写了一套《中国战略性新兴产业研究与发展》（以下简称《研究与发展》）图书。

《研究与发展》以国家相关发展政策和规划为基础，借鉴国外相关产业发展的成功经验，对产业发展思路、发展目标、发展战略、发展重点、投资方向、政策建议等方面进行了全面、系统的研究；对前瞻性、基础性和目前产业上有瓶颈限制的问题提出了有针对性的对策。

《研究与发展》采用分期分批的出版方式陆续出版发行，第一期12个分册图书已于2013年底完成出版，包括：太阳能、风能、生物质能、智能电网、新能源汽车、轨道交通、工程机械、水电设备、农业机械、数控机床、轴承和齿轮。本次出版第二期13个分册图书，包括：功能材料、物流仓储装备、紧固件、模具、内燃机、塑料机械、塑木复合材料、物联网、制冷空调、智能制造、非常规油气、中压开关和工业网络信息安全。今后根据国家产业政策要求及各行业的发展情况还将陆续推出其他分册。

为了出版好《研究与发展》，机械工业出版社成立了《中国战略性新兴产业研究与发展》编委会，全国人大常委会原副委员长路甬祥

担任编委会主任。路甬祥副委员长对该套图书的编写高度重视，亲自参加编委研讨会，多次提出重要指导意见。他从图书的定位、内容选材、作者队伍建设和运作流程等方面都给予了全面和具体的指导，并提出了“六个特点”和“四性”的具体要求。对每个分册的内容重点提出了具体的建议要求。

机械工业出版社还建立了完善的项目管理、编写组织、出版规范和网络支撑四个方面的工作体系来保证图书质量。各组编单位投入了大量的精力组织行业权威专家规划内容结构、研讨内容特色；参与图书编写的主创人员也不计报酬，自觉自愿地把自己的聪明才智和研究成果奉献给社会，奉献给国家。他们都担负着繁重的科研、教学、行业管理或生产任务，为了使此书能够早日与大家见面，他们不辞辛苦、加班加点。因为他们都有一个共同心愿——帮助企业快速成长，使中国由大变强。

在此，衷心地感谢为此项工作付出大量心血的组编单位、各位专家、各位撰稿人、编辑出版及工作人员！

尽管我们做了大量工作，付出了巨大努力，但仍难免有疏漏或错误之处，敬请读者批评指正！

《中国战略性新兴产业研究与发展》编辑部

2016 年 3 月

目录 CONTENTS

序言
前言
编写说明

第 1 篇　功能材料概述

第 1 章　功能材料的概念及特点 …… 2
第 2 章　功能材料的分类及若干基本定义 …… 3
2.1　按传统材料的分类法分类 …… 3
2.2　现代功能材料的分类及发展方向 …… 3
第 3 章　功能材料的发展简史、现状及趋势 …… 6
3.1　功能材料的发展历史 …… 6
3.2　国外功能材料发展现状及趋势 …… 7
3.3　我国功能材料产业发展现状和趋势 …… 10

第 2 篇　纳米功能材料

第 1 章　绪论 …… 14
1.1　纳米科技的兴起 …… 14
1.2　纳米功能材料的定义 …… 15
1.3　纳米功能材料的分类 …… 16
1.4　纳米功能材料的特性 …… 18
1.5　纳米功能材料的发展史 …… 25
第 2 章　国外纳米功能材料发展现状 …… 30
2.1　纳米功能材料科技与产业规模 …… 30
2.2　各国纳米功能材料现状 …… 35

第 3 章　我国纳米功能材料科技与产业发展现状 …… 40
3.1　我国纳米功能材料科技与产业规模 …… 40
3.2　纳米功能材料的主要性能及应用 …… 45
3.3　与纳米功能材料相关的产业政策制定 …… 47
3.4　纳米功能材料科技与产业发展存在的问题 …… 50
第 4 章　我国纳米功能材料资源潜力分析 …… 51
4.1　资源开发利用现状 …… 51
4.2　资源开发潜力 …… 60
4.3　资源可持续性 …… 61
4.4　资源开发预测 …… 62
第 5 章　我国纳米功能材料领域发展的风险分析 …… 63
5.1　纳米功能材料科技与产业发展方向的选择 …… 63
5.2　纳米功能材料发展的风险 …… 67
第 6 章　纳米功能材料行业准入基本条件 …… 70
6.1　资金保障 …… 72
6.2　资源供给保障 …… 74
6.3　技术条件 …… 75
6.4　智囊团队、技术人才 …… 78
6.5　市场渠道开拓 …… 79
第 7 章　纳米功能材料科技与产业发展战略指导 …… 80
7.1　我国纳米功能材料发展目标 …… 80
7.2　纳米功能材料的变化趋势 …… 83
7.3　我国纳米功能材料科技与产业的优势领域 …… 87
7.4　我国纳米功能材料重点工程 …… 88
参考文献 …… 90

第 3 篇　3D 打印材料

第 1 章　3D 打印产业概述 …… 98
1.1　3D 打印的基本概念 …… 98
1.2　3D 打印的优势分析 …… 98

第 2 章　3D 打印材料及其分类 …… 100
2.1　聚合物材料 …… 100
2.2　金属材料 …… 104
2.3　陶瓷材料 …… 106
2.4　复合材料 …… 106
2.5　智能材料 …… 106
2.6　其他 3D 打印材料 …… 108
第 3 章　国外 3D 打印材料研究与产业发展现状 …… 108
第 4 章　我国 3D 打印材料研究与产业发展现状 …… 111
4.1　3D 打印材料产业规模及应用现状 …… 111
4.2　3D 打印材料科技与产业现行政策 …… 113
4.3　3D 打印材料科技与产业发展存在的问题 …… 114
4.4　我国 3D 打印材料领域发展的风险分析 …… 116
第 5 章　3D 打印材料科技与产业发展战略 …… 117
参考文献 …… 118

第 4 篇　电磁流变材料

第 1 章　概　述 …… 122
1.1　基本概念 …… 122
1.2　电磁流变材料的特点及分类 …… 122
1.3　电磁流变材料的发展历程 …… 124
第 2 章　国外电磁流变材料发展现状 …… 125
2.1　电磁流变材料科技与产业规模 …… 125
2.2　电磁流变材料发展潜力 …… 125
2.3　主要国家电磁流变材料发展状况 …… 128
第 3 章　我国电磁流变材料科技与产业发展现状 …… 130
3.1　我国电磁流变材料科技与产业规模 …… 130
3.2　我国电磁流变材料技术与应用现状 …… 131
3.3　科技与产业发展存在的问题 …… 143
第 4 章　电磁流变材料科技与产业发展战略概述 …… 144

第 5 篇　生物功能材料

第 1 章　生物功能材料概述 …… 148
1.1　生物功能材料的特点及分类 …… 148
1.2　生物功能材料的发展历程 …… 156
第 2 章　国内外生物功能材料产业发展现状 …… 157
2.1　国外生物功能材料发展现状 …… 157
2.2　我国生物功能材料科技与产业规模 …… 161
2.3　生物功能材料科技与产业现行政策 …… 167
2.4　生物功能材料科技与产业发展存在的问题 …… 170
第 3 章　我国生物功能材料资源潜力分析 …… 172
3.1　资源开发利用现状 …… 172
3.2　资源开发潜力 …… 174
3.3　资源可持续性 …… 175
3.4　资源开发措施 …… 177
第 4 章　我国生物功能材料领域发展的风险分析 …… 179
4.1　生物功能材料科技与产业发展方向的选择 …… 179
4.2　生物功能材料发展的风险 …… 182
第 5 章　生物功能材料科技与产业发展战略指导 …… 183
5.1　我国生物功能材料科技与产业战略指导 …… 183
5.2　我国生物功能材料科技与产业的战略布局 …… 189
参考文献 …… 190

第 6 篇　土木工程功能材料

第 1 章　热功能土木工程材料 …… 195
1.1　绝热材料 …… 195
1.2　相变储能材料 …… 202
第 2 章　声功能土木工程材料 …… 208
2.1　吸声材料 …… 208

2.2 隔声材料 …… 212
第 3 章 光功能土木工程材料 …… 214
3.1 透光材料 …… 215
3.2 反光材料 …… 224
3.3 蓄光型自发光材料 …… 227
3.4 光纤传感材料 …… 230
第 4 章 防水功能土木工程材料 …… 232
4.1 防水材料的定义及分类 …… 232
4.2 防水材料的研究与应用现状 …… 236
4.3 防水材料的产业现状 …… 240
第 5 章 密封功能土木工程材料 …… 241
5.1 密封材料的定义及分类 …… 241
5.2 密封材料的研究与应用现状 …… 243
第 6 章 防火功能土木工程材料 …… 244
6.1 防火材料的定义及分类 …… 245
6.2 防火材料的研究与应用现状 …… 248
6.3 防火材料的产业现状 …… 252
第 7 章 装饰功能土木工程材料 …… 252
7.1 装饰材料的定义及分类 …… 253
7.2 装饰材料的研究与应用现状 …… 259
7.3 装饰材料产业现状 …… 263
第 8 章 力功能土木工程材料 …… 264
8.1 耗能减震功能材料 …… 264
8.2 特性拦阻系统材料 …… 268
8.3 耐磨（冲）和防滑功能土木工程材料 …… 269
第 9 章 电功能土木工程材料 …… 271
9.1 导电功能材料 …… 271
9.2 电热功能材料 …… 272
9.3 压电功能材料 …… 274
9.4 电流变功能材料 …… 277
第 10 章 磁功能土木工程材料 …… 278
10.1 磁流变功能材料 …… 278

10.2 磁致伸缩功能材料 …… 279
第 11 章 电磁功能土木工程材料 …… 280
11.1 电磁屏蔽功能材料 …… 280
11.2 电磁吸收功能材料 …… 283
第 12 章 智能土木工程材料 …… 285
12.1 智能土木工程材料的定义及分类 …… 285
12.2 智能土木工程材料的研究现状 …… 286
12.3 智能土木工程材料的应用与发展 …… 288
第 13 章 纳米土木工程功能材料 …… 289
13.1 纳米土木工程功能材料的定义和分类 …… 290
13.2 纳米土木工程功能材料的研究与应用现状 …… 290
结 语 …… 293
参考文献 …… 293

第 7 篇 新能源材料

第 1 章 新能源材料概述 …… 300
1.1 关于新能源材料的若干基本概念 …… 300
1.2 新能源材料的特点及分类 …… 301
1.3 新能源材料的发展历程 …… 305
第 2 章 世界新能源材料发展评述 …… 313
2.1 新能源材料科技与产业发展趋势 …… 313
2.2 新能源材料发展潜力 …… 315
2.3 新能源材料现行政策 …… 318
2.4 主要国家和地区的新能源材料发展状况 …… 324
第 3 章 我国新能源材料科技与产业发展现状 …… 326
3.1 我国新能源材料科技与产业规模 …… 327
3.2 新能源材料应用现状 …… 328
3.3 新能源材料科技与产业现行政策 …… 328
3.4 新能源材料科技与产业发展存在的问题 …… 330
第 4 章 我国新能源材料资源潜力分析 …… 331
4.1 资源开发利用现状 …… 331

4.2 资源开发潜力 …… 340
4.3 资源可持续性 …… 347
第 5 章 我国新能源材料领域发展的风险分析 …… 352
5.1 新能源材料科技与产业发展方向的选择 …… 352
5.2 新能源材料发展的风险 …… 355
第 6 章 新能源材料行业准入基本条件 …… 360
6.1 资金保障 …… 360
6.2 资源供给保障 …… 363
6.3 技术条件 …… 366
6.4 智囊团队、技术人才 …… 368
6.5 市场渠道开拓 …… 369
第 7 章 新能源材料科技与产业发展战略指导 …… 370
7.1 我国新能源材料科技与产业战略指导 …… 370
7.2 我国新能源材料科技与产业的战略布局 …… 379
参考文献 …… 384

附录 我国钒、钛、碲、铋战略资源潜力分析

第 1 章 我国碲铋资源开发利用现状 …… 390
1.1 碲、铋资源概况 …… 390
1.2 铋资源品质特性分析 …… 391
1.3 碲资源品质特性分析 …… 392
1.4 铋的生产工艺 …… 394
1.5 碲的生产工艺 …… 396
1.6 碲、铋资源潜力分析 …… 399
第 2 章 我国钒、钛资源潜力分析 …… 404
2.1 我国钒钛磁铁矿资源及开发潜力分析 …… 404
2.2 我国主要其他含钒矿物资源及开发潜力分析 …… 420
2.3 主要其他含钛矿物资源及开发潜力分析 …… 425
参考文献 …… 427

第 1 篇

功能材料概述

第 1 章　功能材料的概念及特点

功能材料是指那些具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学、力学、化学、生物医学等功能，特殊的物理、化学、生物学效应，能完成功能相互转化，主要用来制造各种功能元器件而被广泛应用于各类高科技领域的材料。

功能材料是新材料领域的核心，是国民经济、社会发展及国防建设的基础和先导。它涉及信息技术、生物工程技术、能源技术、纳米技术、环保技术、空间技术、计算机技术和海洋工程技术等现代高新技术及其产业。功能材料不仅对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，还对我国相关传统产业的改造和升级，实现跨越式发展起着重要的促进作用。

功能材料主要有以下特征：

（1）功能材料的功能对应于材料的微观结构和微观物体的运动，这是最本质的特征。

（2）功能材料的聚集态和形态非常多样化，除了晶态外，还有气态、液态、液晶态、非晶态、准晶态、混合态和等离子态等。除了三维体相材料外，还有二维、一维和零维材料。除了平衡态，还有非平衡态。

（3）结构材料常以材料形式为最终产品，而功能材料有相当一部分是以元件形式为最终产品，即材料元件一体化。

（4）功能材料是利用现代科学技术、多学科交叉的知识密集型产物。

（5）功能材料的制备技术不同于结构材料用的传统技术，而是采用许多先进的新工艺和新技术，如急冷、超净、超微、超纯、薄膜化集成化、微型化、密积化、智能化以及精细控制和检测技术。

（6）功能材料中，如仪器仪表材料、航空航天材料、武器装备材料等还具有高性能、多功能、多品种、产量少、附加值高、市场规模小和产品更新快等特点。

目前，现代技术对物理功能材料的需求最多，因此，物理功能材料发展最快，品种多、功能新、商品化和实用率高，在已使用的功能材料中占了绝大部分。

第 2 章　功能材料的分类及若干基本定义

功能材料种类繁多、用途广泛，正在形成一个规模宏大的高技术产业群，有着十分广阔的市场前景和极为重要的战略意义。

功能材料的分类可以依据材料实质上的差异来划分，也可以从形式上的不同来划分。此外，也可以从材料的应用技术领域来划分。

2.1　按传统材料的分类法分类

基于材料的物质性的分类，即按材料的化学键、化学成分分类。例如，按化学键分类为：金属功能材料、无机非金属功能材料、有机功能材料、复合功能材料。有时还按化学成分、晶体结构、显微组织再进一步细分小类、品种。

基于材料的功能性的分类，即按材料的物理性质、功能来分类。例如，按材料的主要使用性能，将功能材料大致分类为九大类：力学功能材料、声学功能材料、热学功能材料、电学功能材料、磁学功能材料、光学功能材料、化学功能材料、生物医学功能材料和核功能材料。

这些功能材料还可按其功能（效能和作用）再细分小类，即按材料在具体应用中所发挥的有利作用来细分类。如，电功能材料可按功能作用再细分类为：绝缘材料、导电和超导电材料、电阻材料、电容器材料（介电材料）、电热材料和电光材料等。

按功能材料的应用技术领域，可分为：光电材料、电工材料、太阳能材料、储氢材料、生物医学工程材料、仪器仪表材料、传感器材料和反应堆材料等。

2.2　现代功能材料的分类及发展方向

由于现代技术领域在不断变革，功能材料各学科相互交融，各层次的划分是相对的。随着功能材料科技与产业的发展，特别是 21 世纪信息技术的发展，功能材料分类发生了巨大的变化，也衍生出许多新兴的材料。同时，鉴于功能材料的分类有交叉、混合特点，现代科技也赋予功能材料新的定义、特征及发展方向，结合上述情况可将功能材料分为十类。

2.2.1 纳米功能材料

当物质达到纳米尺度以后，大约在 1 ～ 100nm 范围内，物质的性能就会发生突变，出现特殊性能。这种既不同于原来组成的原子、分子，也不同于宏观的物质的特殊性能构成的材料，即为纳米功能材料。

发展方向：纳米技术及材料将向着与信息技术、现代生命科学和认知科学融合的方向发展，它们的融合将促进所有科技经济领域的创新和新发现。

2.2.2 新能源材料

新能源材料是指实现新能源的转化和利用以及发展新能源技术中所需的关键材料，它是发展新能源技术的核心和应用基础。从材料学的本质和能源发展的观点看，能储存和有效利用现有传统能源的新型材料也可以归属为新能源材料。主要包括以镍氢电池材料、锂离子电池材料为代表的绿色电池材料，燃料电池材料，太阳能电池材料，发展生物质能所需的重点材料，可燃冰，新型相变材料，节能材料（如 LED 发光材料）以及铀、氘、氚为代表的反应堆核能材料等。

2.2.3 生物功能材料

生物功能材料的研究在于开发生物材料的物理、化学、生物特性的应用。生物功能材料的发展可分为两个方面，即功能生物材料和仿生功能材料。功能生物材料的研究在于开发生物材料的物理、化学、生物特性的应用。仿生材料指模仿生物的各种特点或特性而开发的材料。

2.2.4 磁功能材料

磁功能材料分为软磁体功能材料、永磁材料。软磁体功能材料是指在有限时间内能产生不稳定磁场的功能材料，永磁材料是产生磁场的功能材料。

2.2.5 电功能材料

主要分为压电材料、介电材料、光电材料、热电材料和半导体材料等。

压电材料是受到压力作用时会在两端面间出现电压的晶体材料，可分为细晶粒压电陶瓷、$PbTiO_3$ 系压电陶瓷、压电复合材料和多元单晶压电体。介电材料又称电介质，是电的绝缘材料。光电材料是指用于制造各种光电设备（主要包括各种主动、被动光电传感器光信息处理和存储装置及光通信等）的材料，主要包括红外材料、激光材料、光纤材料和非线性光学材料等。热电材料是一种能将热能和电能相互转换的功能材料。半导体材料是一类具有半导体性能（导电能力介于导体与绝缘体之间，电阻率约 1mΩ · cm ～ 1GΩ · cm）、可用来制作半导体器件和集成电路的电子材料。

2.2.6 热功能材料

随着温度的变化，有些材料的某些物理性能会发生显著变化，如热胀冷缩、出现形状记忆效应或热电效应等，这类材料称为热功能材料。主要分为膨胀材料、形状记忆材料、测温材料等。

膨胀材料：热膨胀是指材料的长度或体积在不加外力时随温度的升高而变大的现象。常用的膨胀材料包括低膨胀材料、定膨胀材料和热双金属材料。

形状记忆材料：将该材料制成的具有某种初始形状的制品进行变形后，通过加热等手段处理时，制品又恢复到初始形状。形状记忆材料通常包括形状记忆合金、形状记忆聚合物、形状记忆陶瓷。

测温材料应满足四个基本要求：①材料的某种性质应是温度的单值函数，最好是线性的；②有较强的输出信号；③有较好的测温稳定性和较宽的测温范围；④易于制作成组织性能均匀的丝、片材。对热电偶电极材料，还要求有小的电阻系数和电阻温度系数；对热电阻用感温材料则要求有大的电阻系数和电阻温度系数，受磁场影响小。它包括贵金属热电偶电极材料和热电阻用贵金属感温材料。

2.2.7 光功能材料

光功能材料指在外场（电、光、磁、热、声、力等）作用下，利用材料本身光学性质（如折射率或感应电极化）发生变化的原理，去实现对入射光信号的探测、调制以及能量或频率转换作用的光学材料的统称。按照具体作用机理或应用目的之不同，可把光功能材料进一步区分为电光材料、磁光材料、弹光材料、声光材料、热光材料、非线性光学材料以及激光材料、光导纤维等。

发展方向：①固体激光材料；②光纤，如石英玻璃光纤、多组分玻璃光纤、高双折射偏振保持光纤、单偏振光纤、各种传感器用光纤等；③长余辉发光材料；④光子晶体，如发光二极管、光波导、微波天线、光子晶体光纤、抗手机辐射、光子晶体超棱镜、光子晶体偏振器。

2.2.8 生态环境材料

生态环境材料是指那些具有良好使用性能和优良环境协调性的材料。

其发展方向是：①减少人均材料流量，减少材料集约化程度；②减少寿命周期中的环境负荷，使用生态化的生产工艺；③开发天然能源，使用藏量丰富的矿物和天然材料；④避免使用有害物质，使用“清洁”材料；⑤使用长寿命材料，强化再生利用，强化生物降解性等。

2.2.9 功能复合材料

功能复合材料是指除机械性能以外还提供其他物理性能的复合材料。功能复合材料主要由功能体或增强体及基体组成。功能体可由一种或一种以上功能材料组成，多元功能体的复合材料可以具有多种功能，同时还有可能由于复合效应而产生新的功能。多功能复合材料是功能复合材料的发展方向。

2.2.10 其他新型功能材料

智能材料还没有统一的定义。不过，现有的智能材料的多种定义仍然是大同小异。大体来说，智能材料就是指具有感知环境 (包括内环境和外环境) 刺激，对之进行分析、处理、判断，并采取一定的措施进行适度响应的智能特征的材料。一般说来，智能材料有七大功能，即传感功能、反馈功能、信息识别与积累功能、响应功能、自诊断能力、自修复能力和自适应能力。构成智能材料的基本材料组元有压电材料、形状记忆材料、光导纤维、电（磁）流变液、磁致伸缩材料和智能高分子材料等。

超材料“Metamaterial”是 21 世纪物理学领域出现的一个新的学术词汇，近年来经常出现在各类科学文献。一般文献中都认为 Metamaterial 是“具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料”。其发展方向是零折射率超材料，即超材料可吸收所有光线等。

第 3 章　功能材料的发展简史、现状及趋势

3.1 功能材料的发展历史

功能材料的概念是美国 J.A.Morton 于 1965 年首先提出来的。20 世纪 60 年代以来，各种现代技术的兴起，强烈刺激了功能材料的发展。同时，由于固体物理、固体化学、量子理论、结构化学、生物物理和生物化学等学科的飞速发展以及各种制备功能材料的新技术和现代分析测试技术在功能材料研究和生产中的实际应用，许多新功能材料不仅已经在实验室中研制出来，而且已经小批量生产和得到应用，并在不同程度上推动或加速了各种技术的进一步发展。

20 世纪七八十年代以来，材料发展出现了新的动向，结构材料与功能材料

的关系发生了根本性的变化。随着电力技术的发展，电工冶金、金属磁功能材料和金属电功能材料已得到较大的发展。50 年代随着微电子学技术的发展，半导体电子功能材料迅速发展。60 年代出现激光技术，光学材料面貌为之一新。70 年代光电子材料，80 年代形状记忆合金、储能材料得到迅速发展。90 年代电子信息、能源、制造业技术的发展，特别是国防科技及武器装备的发展需要推动功能材料快速发展。20 世纪末期到 21 世纪初期（“九五”“十五”期间），“863”“973”、国家自然科学基金等开辟了计算机材料、稀土功能材料、生物医用材料、超导材料、储氢等新能源材料、金刚石薄膜、高性能固体推进剂材料、红外隐身材料、材料设计与性能预测等功能材料新领域，取得了一批接近或达到国际先进水平的研究成果。

2005—2010 年，轨道交通、电子通信、新能源、航空航天发展迅猛，新能源材料、电子信息材料、半导体材料、纤维复合材料、生物功能材料、电磁屏蔽材料、轻质高强铝合金和镁合金等新型功能材料企业及产业化基地逐步建成并投产。

3.2 国外功能材料发展现状及趋势

3.2.1 国外功能材料发展现状

目前，以功能材料为核心的新材料产业已被公认为是全球最重要、发展最快的高新技术产业之一，尤其是新型功能材料，对工业、农业、交通、信息、国防以及其他高新技术产业的发展具有毋庸置疑、不可替代的支撑作用。当前功能材料及其应用技术正面临新的突破，诸如超导材料、微电子材料、光子材料、信息材料、能源转换及储能材料、生态环境材料、生物医用材料及材料的分子、原子设计等正处于日新月异的发展之中，发展功能材料技术正在成为一些发达国家强化其经济及军事优势的重要手段。在全球新材料研究领域中，功能材料约占 85% 以上，世界各国均十分重视功能材料的研发与应用，它已成为世界各国新材料研究发展的热点和重点，也是世界各国高技术发展中战略竞争的热点。

仅就 2014 年而言，美国在纳米功能材料、生物功能材料、特种金属功能材料以及非金属材料领域获得多项突破。英国纳米功能材料的石墨烯研究应用依

然领先，其他新型材料研究及应用取得新成果。德国成功研发人造骨髓、离子液体聚合物智能薄膜、钢铝混合化合物等新材料。俄罗斯在世界上首次使用可吸收血管支架，培育出可制造软骨组织的人工材料；开发出具有防窃听功能的复合涂层。法国研制出可吸收污染物的纳米管海绵、高导电性有机金属材料以及一种新结晶形式“冰十六”。加拿大研制出先进“隐形”伪装布料，设计出可显著降耗的纳米光缆。韩国在太阳电池和可穿戴电子装备的可用材料方面取得突破。日本开发出世界上最耐热的生物塑料、高强度医用凝胶和更节省稀土的磁石制造技术。

根据统计，2014 年新材料技术产业在世界市场的销售额预计超过 10 000 亿美元，其中功能材料约占 80%。某些特种功能材料就其单项而言，市场也是巨大的。2014 年信息功能陶瓷材料及其制品的世界市场销售额已达 800 亿美元。2014 年半导体材料市场规模增长 3%，收入增长 10%，销售额达 443 亿美元，其中高温超导电力设备的全球销售额达 250 亿～ 260 亿美元，到 2020 年，全球与超导相关产业的产值可能达到 1 500 亿～ 2 000 亿美元，其中高温超导占 60%。2010 年全球钕铁硼永磁材料的市场需求量达 13.4 万 t，产值达 80 亿美元，带动相关产业产值 700 亿美元。生物医用材料是一个正在迅速发展的高技术领域，2014 年全球生物医用材料及制品的产值超过 1 000 亿美元，美国约 400 亿美元，是美国经济中五种高技术关键新材料产业之一，近年来生物医用材料一直保持每年 20% 以上的速率持续增长。随着可持续发展政策被各国政府广泛采纳，生态环境材料的市场需求迅速增加，2015 年的社会需求高于 800 亿美元。可见，在全球经济中，功能材料无论是需求规模，还是需求的增长速度，都相当惊人。

3.2.2 国外功能材料产业发展趋势

1. 美国发布《材料基因组战略规划》

2014 年 12 月美国发布了《材料基因组战略规划》，预计该规划的执行时间在 2015—2018 年。在资金投入方面，美国联邦政府已投入 2.5 亿美元用于基础设施研发和创新，预计未来投资将持续加大。《材料基金组计划战略规划》以国家层面最高级规划的形式保证后续实施。其目标是：将发现、发展、生产和部署先进材料的速度提高 2 倍（由原来的 10 ～ 20 年缩减到 5 ～ 10 年），并将成本

降为原来的一小部分。这个战略规划将协调和指导联邦政府的投资和研发活动，为其的发展指明方向。该战略规划公布了 9 大材料类别研究领域下的 63 个重点方向，其中树脂基复合材料、关联材料、电子和光子材料、储能材料以及轻质结构材料这 5 类材料涉及的 37 个重点方向对国家安全影响重大。

2. 俄罗斯公布《2030 年前材料与技术发展战略》细节

俄罗斯联邦政府所属的军事工业委员会科学技术委员会在 2012 年批准了全俄航空材料研究院及其他合作研究机构合作制定的《2030 年前材料与技术发展战略》，该战略预期执行时间为 2014—2030 年。从 2014 年开始实施，5 年内总拨款规模约 500 亿卢布。2014 年 1 月开始，该战略的重点材料发展方向相继公布，主要有 18 个战略发展方向，包括智能材料、金属间材料、高温金属材料、聚合物材料、纳米结构复合材料和涂层等，战略本身将附带 10 个主要计划。在 18 个战略发展方向中，约 80% 的方向与发动机研制和现代化有关，主要有以下五个方面：单晶耐高温合金发动机叶片、自组织纳米复合材料涂层、高梯度定向结晶技术、真空熔炼技术、发动机材料与国际标准接轨。

3. 欧盟发布石墨烯旗舰计划首份招标公告和科技路线图

2014 年 2 月欧盟发布石墨烯旗舰计划，预期执行时间 2013—2020 年。资金投入方面分两个阶段进行：初始阶段（2013 年 10 月 1 日至 2016 年 3 月 31 日）共资助 5 400 万欧元，稳定阶段（2016 年 4 月开始）预计每年资助 5 000 万欧元。2014 年 2 月初，欧盟未来新兴技术 (FET) 石墨烯旗舰计划发布了首份招标公告和科技路线图，介绍了拟资助的研究课题和支持课题，以及根据领域划分的工作任务，每项课题都涉及多项工作任务。根据路线图，石墨烯旗舰计划将分初始热身阶段和稳定阶段两部分进行，主要包括新兴传感技术与生物学的融合、面向射频应用的无源组件、高频电子学三个重点方向。

4. 欧盟制定“欧洲冶金计划”

2014 年 9 月欧盟制定“欧洲冶金计划”，预期执行时间 2014—2020 年，预计该计划总经费投入 10 亿欧元。2014 年 9 月 9 日，欧洲空间局联合一些知名研究机构和超过 180 家欧洲公司，在伦敦科学博物馆正式启动名为“欧洲冶金”计划的研究，旨在发展 21 世纪新型金属及其制造技术，参与该计划的有空客、罗罗、西门子、BAE 系统公司等大型公司。“欧洲冶金”计划将围绕 13 个主题开展研究，

包括用于空间和核系统的新型耐热合金、基于超导合金的高效电源线、可将废热转化为电的热电材料、生产塑料和药物的新型催化剂、用于医疗移植的生物相容性金属以及高强度的磁系统等。

5. 日本最大碳纤维供应商东丽公司制定中远期碳纤维计划“AP-G 2016”

2014 年 2 月日本最大碳纤维供应商东丽公司制定中远期碳纤维计划“AP-G 2016”，预期执行时间 2014—2017 年。从 2014 年开始，在三年内投资 1 800 亿日元用于技术开发，另外投资 4 000 亿日元用于资产建设。截至 2017 年 3 月，计划实现销售额 2.3 万亿日元，净利润 1 800 亿日元。

从世界各国关于材料的规划来看，功能材料的研究极为活跃，充满了机遇和挑战，而新技术、新专利层出不穷。发达国家企图通过知识产权的形式在特种功能材料领域形成技术垄断，并试图占领我国广阔的市场，这种态势已引起我国的高度重视。

3.3 我国功能材料产业发展现状和趋势

3.3.1 我国功能材料产业发展现状

功能材料作为新材料领域的核心，历来得到我国各级政府和社会各界的高度重视和大力扶持。自 2010 年以来，我国功能材料产业规模稳步增长，由 2010 年 5 500 亿元增长至 2014 年 13 000 亿元左右。而在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》、“863”“973”“国家自然科学基金”“国家重点支持的高新技术领域”等计划中都将功能材料作为重点发展内容。在“九五”“十五”国防计划中将特种功能材料列为“国防尖端”材料。在“863”计划支持下，开辟了超导材料、平板显示材料、稀土功能材料、生物医用材料、储氢等新能源材料，金刚石薄膜，高性能固体推进剂材料，红外隐身材料，材料设计与性能预测等功能材料新领域，取得了一批接近或达到国际先进水平的研究成果，在国际上占有了一席之地。

近年来，我国也在新型稀土永磁材料、生物医用材料、生态环境材料、催化材料与技术等领域加强了专利保护。虽然从 2014 年的专利授权总数看我国仅次于美国，但是，我国目前功能材料的创新性研究不够，申报的专利数，尤其是具

有原创性的国际专利存量数与我国的地位远不相称。我国功能材料在系统集成方面也存在不足，有待改进和发展。功能材料是关系到我国能否顺利实现第三步战略目标的关键新材料，在国家政策的引导下，通过采用新的制备技术和学科交叉来提高已有基础性功能材料及器件的技术水平、功能特性和产业规模；跟踪国外技术发展与自主创新相结合，功能材料的发展和应用已向清洁高效能源技术、环境技术等重要领域扩展，材料的环境适应性和极限使用性能日益受到关注；在新型功能材料、光电子材料与器件、纳米和薄膜材料与器件、智能材料与工程结构技术等方面的研发与产业化已经取得了重要发展。

3.3.2 我国功能材料产业发展趋势

我国作为一个 13 亿人口的大国，正在实施宏伟的发展战略，这一根本国情加之功能材料在经济社会发展中的重要作用和地位，决定了我国对功能材料的需求将是巨大的。

功能材料不仅是发展我国信息技术、生物技术、能源技术等高技术领域和国防建设的重要基础材料，而且是改造与提升我国基础工业和传统产业的基础，直接关系到我国资源、环境及社会的可持续发展。

我国国防现代化建设一直受到以美国为首的西方国家的封锁和禁运，所以我国国防用关键特种功能材料是不可能依靠进口来解决的，必须要走独立自主、自力更生的道路。如军事通信、航空、航天、导弹、热核聚变、激光武器、激光雷达、新型战斗机、主战坦克以及军用高能量密度组件等，都离不开特种功能材料的支撑。特种功能材料也是我国核电、电子、建筑、造船等领域产业技术升级的重要功能材料。我国当前已进入重化工业阶段，汽车、机械、石化、航空、航天、军工和铁道等行业迎来快速发展，对高性能特种功能材料的需求量将大幅增长。目前国内大量依赖进口，极大限制了相关行业的发展。高性能特种功能材料行业发展趋势是技术提升、结构调整、品种优化、质量提高、淘汰落后；企业重组、产业集中和产品优化。节约资源、节约能源、保护环境是特种功能材料的发展方向，产品将向特、精、高的方向发展，向深加工、高附加值发展，企业向低成本、高效率、生态型发展；部分不符合市场需求的产品和中小型企业将最终退出市场。随着互联网、移动通信等新一代电子信息技术的迅速崛起，作为一大批基础电子元器件技术核心的信息功能材料将日益成为

我国发展相关高技术的需求重点。按照 5% 的世界市场占有率计，2014 年我国信息功能材料及制品的年销售额达 600 亿元，对信息通信产业发展具有举足轻重的作用。

我国能源（超临界、超超临界大型火电机组、大型民用核电站等）、冶金、航空航天、石油化工、煤化工等行业重大装备技术升级，以及电动汽车、物联网等行业的发展，对新能源材料及元件提出了高精度、大容量、长寿命（10 年以上）、大功率充放电等特殊要求。

随着我国人民生活质量的进一步改善和提高，我国潜在的生物医用材料市场将很快转化为充满勃勃生机的现实市场，从而创造出巨大的社会经济效益，成为国民经济的一个支柱产业。

近年来，功能材料成为材料科学和工程领域最为活跃的部分。每年以 20% 以上的速度增长，相当于每年有近 1.25 万种新材料问世。未来世界需要更多的功能材料，功能材料正在渗透到现代生活的各个领域。

第 2 篇

纳米功能材料

第1章 绪 论

1959年，著名理论物理学家、诺贝尔奖获得者费曼曾预言：“毫无疑问，当我们得以对纳微尺度的事物加以操纵的话，将大大地扩充我们可能获得物性的范围”。同时又提出疑问“如果有朝一日人们能把百科全书储存在一个针尖大小的空间并能移动原子，那么这将给科学带来什么？”这就是关于纳米技术“小尺寸大世界”的著名预言。

1991年，IBM的首席科学家Armstrong曾预言：“我们相信纳米技术将在信息时代的下一个阶段占中心地位，并发挥革命的作用，正如20世纪70年代初以来微米技术已经起的作用那样。”

1993年，诺贝尔物理学奖获得者在给江泽民的一封信中提到：“我确信纳米科技已经具有了150年前微米科技所具有的希望和重要意义。150年前，微米成为新的精度标准，并成为工业革命的技术基础，最早和最好学会并使用微米技术的国家都在工业发展中占据了巨大的优势。同样，未来的技术将属于那些明智地接受纳米作为新标准，并首先学习和使用它的国家。”

著名科学家钱学森也预言：“纳米和纳米以下的结构是下一个阶段科技发展的一个重点，会是一次技术革命，从而将是21世纪又一次产业革命。”

这些预言十分精辟地指出了纳米技术的地位和作用。

1.1 纳米科技的兴起

1990年在美国巴尔的摩召开了第一届纳米科技会议，把国际上采用的0.1～100nm的加工技术的公差作为纳米技术的标准，统一了定义。会议正式提出了一系列与纳米材料学、纳米生物学、纳米电子学和纳米机械学相关的术语与概念，从此以后，纳米科技迅速崛起。所谓“纳米科技”，就是在0.1～100nm的尺度上，研究原子、分子和其他类型物质的运动和变化的科学；同时在这一尺度范围内对原子、分子等进行操纵和加工的技术，又称为纳米技术。其基本含义是在纳米尺寸(10^{-9}～10^{-7}m)范围内认识和改造自然，通过直接操作原子和分子创制新的物质和器件。

纳米技术是21世纪科技产业革命的重要内容之一，主要包括创造和制备性能优异的纳米材料，制备各种纳米器件和装置，探测和分析纳米区域的性质和现

象。纳米技术可以与工业革命相比拟，是物理、化学、生物学、材料科学和电子学高度交叉的综合性学科，不仅包含以观测、分析和研究为主线的基础学科，还有以纳米工程与加工学为主线的技术科学，所以纳米技术是融前沿科学与高技术为一体的完全体系。

1.2 纳米功能材料的定义

纳米材料是纳米科技领域最富有活力、研究内涵十分丰富的学科分支，在纳米技术出现和飞速发展的几十年期间，纳米材料所具备的优异物理和化学性质使其不断地拓展到材料、生物、农业、能源和国防等众多领域，并伴随着计算机技术、核分析技术、扫描隧道显微镜技术和微电子技术等现代技术的发展，进入了突飞猛进的发展时期，新型纳米材料层出不穷。

我国在国际上率先制定了《纳米材料术语》标准（GB/T 19619—2004），将纳米材料定义为：物质结构在三维空间至少有一维处于纳米尺度，或由纳米结构单元组成且具有特殊性质的材料。其中，纳米尺度是指在 1 ～ 100nm 范围内的几何尺度；纳米结构单元是指具有纳米结构特征的物质单元，包括稳定的团簇或人造原子团簇、纳米晶、纳米微粒、纳米管、纳米棒、纳米线、纳米单层膜及纳米孔等。

当材料尺寸达到纳米尺度以后，由于组成单元的尺度小，界面占用相当大的成分，物质的性质会发生突变，产生许多奇异现象。例如，当尺寸降到纳米尺度以后，具有良好导电和导热特性的铜和银导电、导热特性消失，铁、钴、镍等磁性材料自发磁化取向完全一致，形成单磁畴。这些由纳米尺寸构成的体系所呈现的特殊性质不同于通常的大块宏观体系，这种具有既不同于原来组成的原子、分子，也不同于宏观物质的特殊性能的材料，即为纳米功能材料。值得注意的是，如果仅仅是尺度达到纳米尺度，而没有呈现出特殊性能的材料，不能叫纳米功能材料，二者缺一不可。

随着材料科学与微加工技术的进步，功能材料已开始由天然物质向人工设计的结构发展，材料组成由单一型向复合型、杂化型转化，颗粒大小由微米级向纳米级过渡，同时也赋予了材料许多功能性特征，为寻找和制造具有特异功能的新材料开辟了道路。

纳米功能材料的研究涉及原子物理、凝聚态物理、胶体化学、固体化学、界面科学等多学科，在不同学科有不同的称谓，在材料学中称之为超微颗粒，在晶体学中称之为微晶，原子分子物理学中称之为团簇，理论物理学中称之为量子点，

胶体化学中称之为胶体微料，生物领域称之为超分子结构。纳米功能材料的研究手段主要是通过纳米合成发展新的纳米材料，通过纳米添加制备纳米复合材料，通过纳米功能化使传统材料进行改性，不断扩大纳米功能材料的应用范围，为诸如陶瓷、晶体、导体、生物医学、建筑行业等注入新鲜血液。

1.3 纳米功能材料的分类

纳米材料的主要特征在于组成单元尺度小，从三维外观尺度上对纳米材料进行分类是最典型的分类方法。纳米材料的基本单元按维数可以分为零维纳米材料、一维纳米材料、二维纳米材料和三维纳米材料。

零维 —— 空间三维尺度均处于纳米尺度范围内，例如纳米粒子 (Nano-particle) 、超细粒子 (Ultrafine particle) 、超细粉 (Ultrafine powder) 、烟粒子 (Smoke particle) 、人造原子 (Artificial atoms) 、量子点 (Quantum dop) 、原子团簇 (Atomic cluster) 及纳米团簇 (Nano-cluster) 等。

典型的零维纳米材料是纳米颗粒，又称纳米尘埃、纳米尘末，指纳米量级的微观颗粒，是一种介于原子、分子与宏观物体之间处于中间物态的固体颗粒材料，它被定义为至少在一个维度上小于 100nm 的颗粒。小于 10nm 的半导体纳米颗粒，由于其电子能级量子化，又被称为量子点。

纳米颗粒具有重要的科学研究价值，它搭起了大块物质和原子、分子之间的桥梁。目前观测到了一些特殊的物理性质，例如：半导体纳米颗粒的量子束缚，一些金属纳米颗粒的表面等离子体共振，磁性材料的超顺磁性。它的形态可能是乳胶体、聚合物、陶瓷颗粒、金属颗粒和碳颗粒。纳米颗粒越来越多地应用于医学、防晒化妆品等中。

原子团簇是 20 世纪 80 年代发现的，指几个至几百个原子的聚集体（粒径小于或等于 1nm），代表了凝聚态物质的初始状态，最典型的原子团簇是碳簇（C_{60}、C_{70}）。原子团簇有许多特殊的性质，具有超高的化学活性和催化活性，这都源于其结构上的特点 —— 尺寸小、处于表面的原子比例极高。

一维 —— 指在空间上有两维处于纳米尺度范围内，例如纳米线、纳米棒、纳米管、纳米丝等。

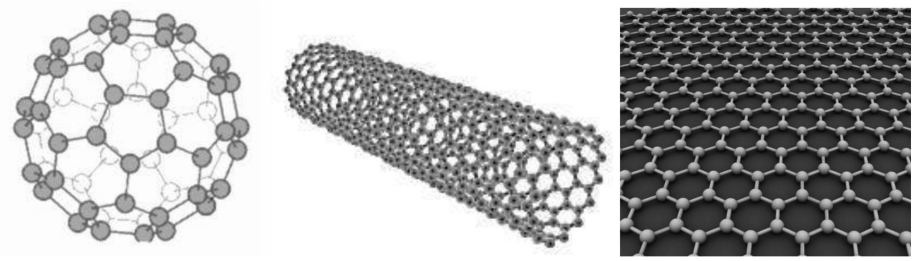
一维的纳米纤维指直径为纳米尺度，而长度大的管状、线状或棒状的纳米材料，碳纳米管就是一种典型的一维纳米材料，具有较好的导电性能和导热性能。碳纳米管可以制成透明导电的薄膜，用以代替氧化铟锡（ITO）作为触摸屏的材料。

二维 —— 在三维空间上只有一维在纳米尺度范围内，典型的二维纳米材料

有薄膜、多层膜、超晶格材料等。

由单层碳原子构成的石墨烯是典型的二维纳米材料，石墨烯的厚度仅为一个碳原子，具有非凡的电子、热学和力学性能，不仅是迄今为止最薄的一种材料，而且是最为牢固、室温下电子传递速度最快的材料，有可能代替硅用于超级计算机。

富勒烯 C_{60}、碳纳米管、石墨烯分别是典型的零维纳米材料、一维纳米材料、二维纳米材料，这三种典型碳纳米材料的结构如图 2-1-1 所示。



a)　　b)　　c)

图 2-1-1　三种典型碳纳米材料的结构图

a）富勒烯 C_{60}　b）碳纳米管　c）石墨烯

三维——指在三维空间中含有上述纳米材料的块体，如纳米玻璃、纳米陶瓷、纳米介孔材料、纳米金属、纳米高分子等。

三维的纳米块体是将纳米粉末高压成型或控制金属液体结晶而得到的纳米单元聚集体材料，主要用途为超高强度材料、保温隔热材料、智能或特种功能材料等。

典型的三维纳米材料当属纳米陶瓷。纳米陶瓷是指陶瓷材料的显微结构中，晶粒、晶界以及它们之间的结合都处于纳米量级水平，包括晶粒尺寸、晶界宽度、第二相分布、气孔与缺陷尺寸等都是纳米级。纳米晶陶瓷材料不仅保持了传统陶瓷材料的优点，又克服了陶瓷易脆的缺点，其良好的力学性能可与超塑性材料相媲美。

以上提到的纳米颗粒、原子团簇、纳米线、纳米棒、纳米薄膜、纳米管等是指材料本身就是纳米尺度，也就是所谓的狭义的纳米材料，而有些材料是以纳米结构作为单元而构成的，例如纳米复合物、纳米介孔材料、纳米固体等，即具有纳米结构的材料，称为纳米结构材料。

纳米材料还可以按结构分类，可分为纳米微粒、纳米固体、纳米纤维、纳米薄膜等。

超细微颗粒就是指 1 ～ 100nm 之间的颗粒，也称为纳米粒子、纳米颗粒。0.1 μm 是颗粒分类的一个临界点，在 0.1 μm 以下，许多物理化学性质发生显著变化，因此将 0.1 μm 即 100nm 定义为超细微颗粒的尺寸上限。目前由机械法粉碎获得的颗粒尺寸只能细化到 1 μm，若想获得超细微颗粒只能用非常规制粉法，例如高能球磨法。颗粒微细化过程如图 2-1-2 所示。

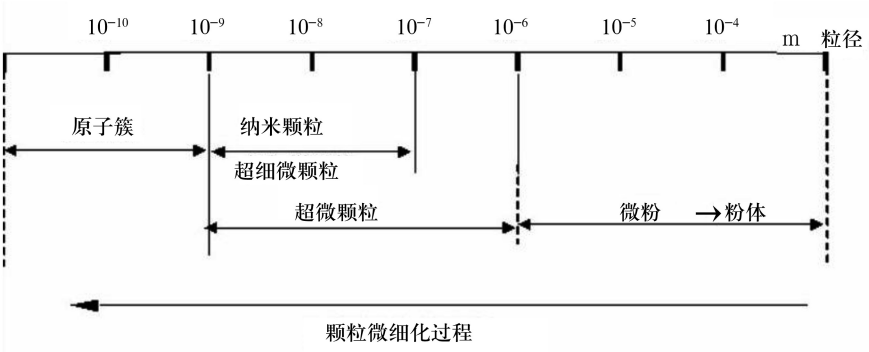


图 2-1-2　颗粒微细化过程

纳米固体材料是由纳米量级的（尺寸为 1 ～ 100nm）超细微颗粒压制烧结而成的三维块体，可以是晶体、非晶或准晶结构。纳米固体材料的最大特点是具有小晶粒和大界面，有巨大的颗粒间界面，如 5nm 颗粒所构成的固体每立方厘米将含 10^{19} 个晶界，原子的扩散系数要比大块材料高 10^{14} ～ 10^{16} 倍，从而使得纳米材料具有高韧性。

纳米纤维就是指添加了纳米级粒子作为填充物的纤维。

按照化学组成，纳米材料可以分为纳米金属、纳米晶体、纳米高分子、纳米陶瓷、无机纳米复合材料、有机纳米复合材料和无机 - 有机纳米复合材料等等。

按照材料物理性质，纳米材料又可以分为纳米磁性材料、纳米非线性光学材料、纳米超导材料、纳米半导体性质材料和纳米热电性材料等。

按照材料的应用范围不同，纳米材料可以分为纳米光电子材料，纳米储能材料、微电子封装材料、吸波隐身材料、高密度磁记录材料、防辐射材料、纳米电子材料、电极材料、太阳能电池材料、高效催化剂、高效助燃剂、高韧性陶瓷材料、纳米生物医学材料、人体修复材料、抗癌制剂等。

1.4　纳米功能材料的特性

纳米材料尺度为 1 ～ 100nm，处于原子簇和宏观物质的过渡区域，材料的物

性会发生突变，与同组分常规材料的性能完全不同，且同类材料的不同性能有不同的临界尺寸，对同一性能，不同材料相应的临界尺寸也有差异。

因此纳米就不再是简单的数学尺度，纳米尺度赋予材料新的物理化学特性，如良好导向绝缘体转变、共价键无极性绝缘体具有导电特性、半导体p型n型转变、熔点下降、明显的化学活性和催化活性、力学性能增强、易烧结等。这些都源于纳米材料的六大效应——量子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应、量子隧道效应、库仑堵塞效应和介电限域效应。

1.4.1 量子尺寸效应

1. 久保（Kubo）理论

久保理论是针对金属超微颗粒费米面附近电子能级状态分布提出来的，有异于处理大块材料费米面附近电子态能级分布的传统理论。原因在于，当颗粒尺寸进入到纳米级时，由于量子尺寸效应，原大块金属的准连续能级产生离散现象。

1962年日本理论物理学家久保(Kubo)对小颗粒的大集合体电子能态做了两点主要假设。

（1）简并费米液体假设　超微颗粒靠近费米面附近的电子状态是受尺寸限制的简并电子气，其能级为准粒子态的不连续能级，准粒子之间交互作用可以忽略不计。

当 $K_BT \ll \delta$（K_BT 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度，δ 为相临二能级间平均能级间隔）时，这种体系费米面附近的电子能级分布服从泊松分布。

$$P_{(n)}(\Delta) = \frac{1}{n!\,\delta}\left(\Delta/\delta\right)^n \exp\ (-\Delta/\delta)$$

式中　Δ —— 两能态之间的间隔；

$P_n\Delta$ —— 对应的几率密度；

n—— 两能态间的能级数。

若 Δ 为相邻能级间隔，则 n=0。

（2）超微粒子电中性假设　Kubo认为，对于一个超微颗粒，取走或移入一个电子都是十分困难的。他提出一个著名公式：

$$K_BT \ll W \approx e^2/d$$

式中　W—— 从一个超微颗粒取走或移入一个电子克服库仑力所做的功；

d—— 超细颗粒的直径；

e—— 电子电荷。

在足够低的温度下，当颗粒尺寸为 1nm 时，W 比 δ 小两个数量级，由上式可知 $K_BT \ll \delta$，可见 1nm 的小颗粒在低温下量子尺寸效应很明显。

久保还提出了另一个著名公式：

$$\delta = \frac{4}{3}\frac{E_F}{N} \propto V^{-1}$$

式中 N—— 一个超微粒的总导电电子数；

V—— 超微粒体积；

E_F—— 费米能级。

当粒子为球形时，$\delta \propto = \frac{1}{d^3}$，即随粒径的减小，能级间隔增大。

2. 量子尺寸效应

金属费米能级附近电子能级在高温或宏观尺寸情况下一般是连续的，但当粒子的尺寸下降到某一纳米值时，费米能级附近的电子能级由连续变为离散的现象，以及纳米半导体微粒中最高被占据分子轨道和最低未被占据的分子轨道的能级间隙变宽的现象，称为量子尺寸效应。

由于纳米粒子会出现能级分裂，当能级间距离大于热能、磁能、光子能量或超导态的凝聚能时，就会因为量子尺寸效应而发生特异的光、热、磁、声、电等现象，也就是出现反常现象。导电的金属在超微颗粒时可以变成绝缘体，比热亦会反常变化，光谱线会产生向短波长方向的移动；具有铁磁性的磁铁，其粒子尺寸达到纳米级时，即由铁磁性变为顺磁性；纳米金属微粒在低温时，由于量子尺寸效应会呈现绝缘性等，这些都是量子尺寸效应的宏观表现。正是由于这些反常特性，纳米粒子在微电子学和光电子学领域占据重要地位。

由于量子尺寸效应，费米能级附近的电子能级由准连续能级变为分立能级，吸收光谱阈值向短波或者长波方向移动，使吸收光谱存在“蓝移”现象，其光吸收率很大，所以可应用于红外线感测器材料。例如，纳米 SiC 颗粒的红外吸收频率为 814cm^{-1}，较大块 SiC 固体（吸收频率 794cm^{-1}）蓝移了 20cm^{-1}。美国贝尔实验室发现半导体硒化镉纳米粒子，发光颜色由红色逐渐转为蓝色。

在另外一些情况下，粒径减小到纳米级时，可观察到光吸收带移向长波长，呈现“红移”现象。这是由于光吸收带的位置是由影响峰位的蓝移因素和红移因素共同作用的结果，若前者的影响大于后者，则发生蓝移，反之发生红移。随着粒径的减小，量子尺寸效应会导致吸收带的蓝移，但是粒径减小的同时，颗粒内部的内应力会增加，导致能带结构发生变化，电子波函数重叠加大，结果带隙、能级间距变窄，这就导致电子由低能级向高能级及半导体电子由价带向导带跃迁

引起光吸收带和吸收边发生红移。例如纳米 NiO 在尺寸降低时红移因素强于蓝移因素，因此吸收带红移。美国伯利实验室制备的可在红、绿、蓝颜色之间变化的发光二极管是通过控制硒化镉纳米颗粒尺寸而得到的。

1.4.2 小尺寸效应

当纳米粒子的尺寸与光波波长、德布罗意波长以及超导态的相干长度或透射深度等物理特征尺寸相当或更小时，晶体周期性的边界条件将被破坏，非晶态纳米粒子的颗粒表面层附近原子密度减小，导致电、磁、光、声、热力学等性质的变化，这称为小尺寸效应，又称体积效应。小尺寸效应也可以理解为：颗粒尺寸变小会引起宏观物理性质的变化，即颗粒尺寸的量变会导致纳米颗粒性质的质变，使其呈现出与大块宏观体系所不同的优异性能。

1. 特殊的光学性质

当金属粒子尺寸降到小于光波波长的尺寸时，对光的反射率变得很低，通常可能低于 1%，使其失去金属光泽而变成黑色，并且尺寸越小，反射率越低，吸收率越大，颜色就越深，在几微米附近金属的光反射率几乎降为零。例如，贵金属金、银、铂等尺寸在纳米量级时，由于吸收光而呈黑色，失去原有的金属光泽。

利用光学特性，贵金属纳米粒子可以作为高效率的光热、光电等转换材料，高效率地将太阳能转变为热能、电能。

2. 特殊的热学性质

固态物质在其形态为大尺寸时，其熔点是固定的；超细微化后却发现其熔点、开始烧结温度、晶化温度将显著降低，比微米级粉体要低得多，当颗粒小于 10nm 量级时尤为显著。

纳米微粒熔点下降一方面由于纳米微粒体积远小于块体材料，熔化时所增加的内能要小；另一方面是由于纳米粒子颗粒小导致超高表面能，比表面原子数多，这些表面原子由于配位不完全而具有较大的活性。烧结是指把粉末先用高压压制成型，然后在低于熔点的温度下使这些粉末相互结合成块。纳米微粒尺寸小、表面能高，压制成块后的界面具有高的能量，在烧结过程中高的界面能成为原子运动的驱动力，使界面中孔洞收缩和空位消失更容易，因此在较低温度下烧结就能达到致密化的目的，即能降低烧结温度。

纳米材料的比热和热膨胀系数都大于同类块状宏观体系的值，这是由于构成材料的粒子尺寸极小，界面原子排列较为混乱、原子密度低、界面原子耦合作用变弱。这些优良特性使纳米功能材料在储热材料方面有其广泛的应用前景。

3. 特殊的磁学性质

小尺寸的超微颗粒磁性与大块材料显著不同，大块的纯铁矫顽力约为80A/m，而当颗粒尺寸减小到 2×10^{-2} μm 以下时，其矫顽力可增加 1 000 倍，若进一步减小其尺寸，大约小于 6×10^{-3} μm 时，其矫顽力降低到零，呈现出超顺磁性。

纳米颗粒尺寸小到一定临界值时，进入超顺磁状态。超顺磁性是指由于颗粒尺寸减小，致使热能大于磁能，磁化方向就不再固定在一个易磁化方向，颗粒的磁化矢量在热激发下随着时间而变，此时整个颗粒与顺磁性原子相似，呈现出超顺磁性。值得注意的是，不同物质呈现超顺磁的临界尺寸是不同的，如 α-Fe，Fe_2O_3 和 α-Fe_2O_3 粒子变成超顺磁性的临界尺寸分别为 5nm、16nm 和 20nm。

利用纳米材料具有的超顺磁性，已做成具有高储存密度的磁记录粉，用于磁带、磁盘、磁卡及磁性钥匙；利用超顺磁性人们已经研制出应用广泛的磁流体，具有抗电磁干扰特性。

4. 特殊的力学性质

纳米结构的材料强度与粒径成反比。应用纳米技术制成的超细或纳米晶粒材料，韧性、强度、硬度大幅提高，因为纳米材料具有大的界面，界面处原子具有较高的活性，原子排列较为混乱，当对纳米材料施加外力时，界面处的原子很容易发生迁移，因此表现为良好的韧性和延展性。例如，向普通陶瓷中添加纳米颗粒，可以使抗弯强度提高 10^3 倍，同时断裂韧性提高 40% ～ 60%。由纳米陶瓷粉烧结的纳米陶瓷克服了普通陶瓷“又硬又脆”的缺点，不仅非常轻质，而且强度极高，可以随着压力产生变形，具有良好的柔韧特性。金属纳米粉压成的金属材料除了强度提高以外，还拥有了“刚柔并济”的新性能，具有较高的弹性模量。纳米陶瓷和纳米纤维凭借奇特的力学性能广泛应用于航空、航天、航海、石油钻探等领域。

1.4.3 表面效应

表面效应是指纳米超微粒子的表面原子数与总原子数之比随着纳米粒子尺寸的减小而大幅度地增加，尺寸变小，其比表面积和表面张力也显著增加，从而产生一系列新奇的性能变化。纳米微粒尺寸小，表面积会显著增大，导致表面能高，位于表面的原子占相当大的比例。粗略估算纳米微粒尺寸与表面原子数的关系见表 2-1-1 和图 2-1-3。

表 2-1-1　纳米微粒尺寸与表面原子数的关系

直径 /nm	1	2	5	10	100
原子总数 /N	30	250	4 000	30 000	3 000 000
表面原子百分数（%）	99	80	40	20	2

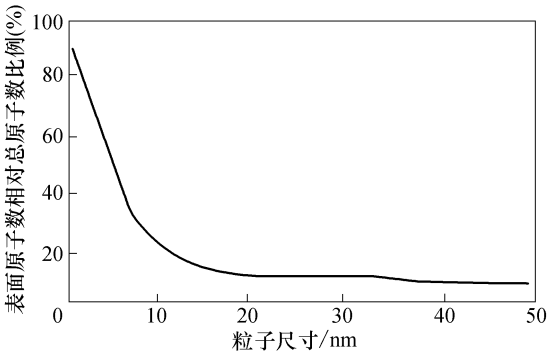


图 2-1-3　微粒尺寸与表面原子数的关系

可以看出当直径小于 100nm 时，其表面原子百分数急剧增长，随着尺寸的降低，迅速增加表面原子的比例。当粒径降到 1nm 时，表面原子数比例达到约 99%，原子几乎全部集中到纳米粒子的表面。

在物质内部，原子周围有其他配位原子，而表面的原子是单侧原子，所处环境与内部原子不同，使表面原子具有与内部原子不同的新性质。表面原子周围缺少相邻的原子，有许多不饱和键，表面原子配位数不足，具有较高的表面能和较高的活性，这些原子易与其他原子相结合而稳定下来。所以纳米晶粒减小的结果是：其比表面积、表面能及表面结合能都迅速增大，致使其表现出很高的化学活性。利用这一特性可制得具有高催化活性和产物选择性的纳米催化剂。值得注意的是，由于纳米颗粒表面活性极高，金属的熔点会降低，未达到着火点便可燃烧起来，可望成为新一代的高效催化剂。

1.4.4　宏观量子隧道效应

微观粒子具有贯穿势垒能力的效应称为隧道效应。电子既具有粒子性又具有波动性，因此存在隧道效应。近年来，人们发现一些宏观量，例如微粒的磁化强度、量子相关器件中的磁通量等也具有隧道效应，可以穿越宏观体系的势垒而产生变化，故称之为宏观的量子隧道效应。这一效应与量子尺寸效应一起，将会是未来微电子、光电子器件的基础。当微电子器件进一步微型化时必须考虑上述的

量子效应。例如，在制造半导体集成电路时，当电路的尺寸接近电子波长时，电子就通过隧道效应而溢出器件，使器件无法正常工作，经典电路的极限尺寸大概在0.25 μm。目前研制的量子共振隧穿晶体管就是利用量子效应制成的新一代器件。

1.4.5 库仑堵塞效应

库仑堵塞效应是20世纪80年代介观领域所发现的极其重要的物理现象之一。当体系的尺寸进入纳米级时（一般金属粒子为几个纳米，半导体粒子为几十纳米），体系的电荷是“量子化”的，即充电和放电过程是不连续的。

充入了一个电子所需的能量 $E_c = e^2/2C$，e为一个电子的电荷，C 为小体系的电容，体系越小，C 越小，能量 E_c 越大，这个能量称为库仑堵塞能，也即库仑堵塞能是前一个电子对后一个电子的库仑排斥能。

若两个量子点通过一个“结”连接起来，一个量子点上的单电子穿过能垒到另一个量子点上的行为称量子隧穿。为使一个单电子从一个量子点隧穿到另一个量子点，在一个量子点上所加的电压 $(U/2)$ 必须克服 E_c，即 $U > e/C$。利用库仑堵塞能和量子隧穿效应可以设计下一代纳米结构器件，如单电子晶体管和量子开关等。由于库仑堵塞效应的存在，电流随电压变化的关系不再是线性关系，而是呈现锯齿状台阶。

利用纳米粒子的隧道量子效应和库仑堵塞效应制成的纳米电子器件具有超高速、超容量、超微型低能耗的特点，有可能在不久的将来全面取代目前的常规半导体器件。

1.4.6 介电限域效应

随着纳米晶粒粒径的不断减小和比表面积不断增加，其表面状态的改变将会引起微粒性质的显著变化。例如，当在半导体纳米材料表面修饰一层某种介电常数较小的介质时，相对于裸露于半导体纳米材料周围的其他介质而言，被包覆的纳米材料中电荷载体的电力线更易穿过这层包覆膜，从而导致其与裸露纳米材料的光学性质相比发生了较大的变化，这就是介电限域效应。当纳米材料与介质的介电常数值相差较大时，将产生明显的介电限域效应。

上述的小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和介电限域效应都是纳米颗粒及纳米固体的基本特征，这一系列效应导致了纳米材料在熔点、蒸气压、相变温度、光学性质、化学反应性、磁性、超导及塑性形变等许多物理和化学方面都显示出特殊的性能。它使纳米材料呈现出许多奇异的物理、化学性质。

1.5 纳米功能材料的发展史

纳米材料的发展历史大致可分为三个阶段：

第一阶段（1990 年以前） 主要是在实验室探索用各种手段制备各种材料的纳米颗粒粉体、合成块体（包括薄膜），研究评估表征的方法，探索纳米材料不同于常规材料的性能。研究的对象局限在单一材料和单相材料，国际上通常把这类材料称为纳米晶或纳米相材料。

第二阶段 (1990—1994 年) 研究热点是如何利用纳米材料已挖掘出来的奇特物理、化学和力学性能，设计纳米复合材料，通常采用纳米微粒与纳米微粒结合、纳米微粒与常规块体复合以及发展纳米复合薄膜等。

第三阶段 (1994 年至现在) 重点在于纳米组装体系，人工组装合成的纳米结构的材料体系越来越受到人们关注。这一阶段研究的特点是强调按照人们的意愿设计、组装、创造纳米体系，实现人们所希望的特性。基本特点是以纳米微粒、微米线、纳米管等为基本单元，在一维、二维和三维空间组装、排列成纳米结构体系，包括纳米陈列体系、介孔组装体系、薄膜镶嵌体系等。

1.5.1 纳米功能材料的起源

最早的纳米材料可以追溯到两千年以前，中国古代的铜镜的保护层就是纳米氧化锡，起到了保护防锈的作用。中国古代的墨及染料实际上就是纳米级的炭黑，古代的宝剑等微晶化增强已经得到科学证实。公元四世纪古罗马的莱格拉斯雕玻璃酒杯，在反射光下呈绿色、在透射光下呈红色，这种奇妙的颜色变化就源于在玻璃杯的内层形成了微量的金、银纳米粒子。两千多年以前的希腊－罗马时期，古埃及人掌握了一种把头发染黑的技术，其机理是通过原位反应的方式，在头发的皮质层及表层形成了均粒径约为 5nm 的方铅矿纳米微粒。古人利用纳米材料的例子还有很多，因为人的肉眼根本就看不到纳米尺度小颗粒，当时并不知道是纳米技术的作用。虽然都是“无意之作”，但足以表明古人的聪明智慧以及纳米材料的巨大魅力。

1.5.2 纳米技术的规模化发展

1990 年，在首次召开的国际纳米科技会议上，正式把纳米材料学定为材料科学的一个分支，人们开始从材料科学的角度探索纳米材料的结构与性能之间的关系。科技界都认为 1990 年是纳米技术正式形成的一个标志性的时间，从此以后，世界各国开始真正大规模的对纳米科技进行投入，纳米复合材料的设计、开发及性能研究一度成为纳米材料研究的主导方向。

1994 年，在波士顿召开的 MRS 秋季会议上正式提出纳米材料工程的概念，

标志着纳米材料正式进入应用研究领域。从此，纳米材料科学与工程成为材料科学与工程学院的一个完整的分支学科，属于纳米科技与材料科学以及工程的交叉学科，而纳米材料则成为一种新型的先进材料备受瞩目。

1997 年，美国科学家首次成功地用单电子移动单电子，利用这种技术可开展量子计算机的研制。

1999 年，巴西和美国科学家在进行纳米碳管实验时发明了世界上最小的“秤”，它能够称量 10^{-9}g 的物体，即相当于一个病毒的重量；此后不久，德国科学家研制出能称量单个原子重量的秤，打破了美国和巴西科学家联合创造的纪录。

2000 年 4 月，美国能源部桑地亚国家实验室运用激光微细加工技术研制出智能手术刀。该手术刀可以每秒扫描 10 万个癌细胞，并将细胞所包含的蛋白质信息输入计算机进行分析判断。

2001 年纽约斯隆－凯特林癌症研究中心的戴维·沙因贝格尔博士报道了把放射性同位素钢 -225 的一些原子装入一个形状像圆环的微型药丸中，制造了一种消灭癌细胞的靶向药物。纳米技术应用于医学的进展是十分迅速的。

1.5.3 纳米功能材料的商业化发展

21 世纪开端，纳米科技迅猛发展，纳米材料不仅仅局限于金属、陶瓷、半导体、高分子等领域，纳米复合材料如雨后春笋般涌出，已经商品化的产品层出不穷。图 2-1-4 为纳米功能材料商业化技术路线图。

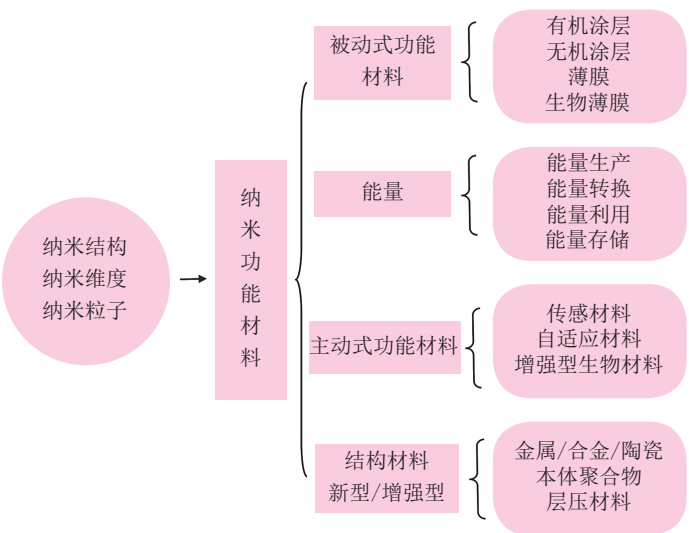


图 2-1-4 纳米功能材料商业化技术路线图

1.5.4 纳米功能材料的多元化应用

20 世纪末以来，纳米功能材料因其独特的结构和优越的性能，一直处于快速发展的状态，成为材料学科中最活跃的研究领域，主要包括纳米材料的制备、复合、表征、多元化应用。目前，纳米功能材料的应用越来越广泛。

1. 纳米功能材料在磁学中的应用

纳米磁性材料是纳米材料中最早进入工业化生产、至今还充满活力、具有宽广应用前景的一类人工功能材料。

（1）纳米磁记录材料　磁记录是信息储存与处理的重要手段，科学的发展要求记录密度越来越高。磁性纳米微粒具有尺寸小、单磁畴结构、矫顽力很高的特性，用它制作磁记录材料可以改善图像质量。作为磁记录单位的磁性粒子的大小须满足以下条件：颗粒的长度应小于记录波长；粒子的宽度（如可能长度也包括在内）应该远小于记录深度；一个单位的记录体积中，应尽可能有更多的磁性粒子。

（2）纳米巨磁电阻材料　1994 年，IBM 公司研制成运用巨磁电阻效应的读出磁头，将磁盘记录密度提高了 17 倍，达到 5G bit/in^2，最近报道为 11G bit/in^2，从而在与光盘竞争中磁盘重新处于领先地位。

利用巨磁电阻效应在不同的磁化状态具有不同电阻值的特点，可以制成随机储存器（MRAM），其优点是在无电源的情况下可继续保留信息。巨磁电阻材料应用前景非常广阔。

（3）新型的磁性液体　磁性液体的主要特点是：在磁场作用下，可以被磁化，可以在磁场作用下运动，但同时又是液体，具有液体的流动性。磁性液体主要用于旋转轴的动态密封、新的润滑剂、增进扬声器功率、作阻尼器件等。

（4）纳米微晶软磁材料　该材料目前沿着高频、多功能方向发展，其应用领域将遍及软磁材料应用的各方面，如功率变压器、脉冲变压器、高频变压器、扼流圈、可饱和电抗器、互感器、磁屏蔽、磁头、磁开关、传感器等。

（5）纳米微晶稀土永磁材料　稀土永磁材料的问世使永磁材料的性能突飞猛进，已历经 $SmCo_5$、Sm_2Co_{17} 以及 $Nb_2Fe_{14}B$ 三个发展阶段。目前烧结 $Nb_2Fe_{14}B$ 稀土永磁的磁能积已高达 432kJ·m^{-3}（54MGOe），接近理论值 512kJ·m^{-3}（64MGOe），并已进入规模生产。进一步提高纳米永磁材料的性能仍然是当前研究工作的热点。

（6）纳米磁致冷　磁致冷是利用自旋系统磁熵变的致冷方式进行制冷的。与通常的压缩气体式致冷方式相比较，它具有效率高、功能低、噪声小、体积小、

无污染等优点。

2. 纳米功能材料在催化领域的应用

（1）纳米粒子的化学催化 化学催化的作用主要可归结为三个方面：一是提高反应速度，增加反应效率；二是决定反应路径，有优良的选择性，例如只进行氢化、脱氢反应，不发生氢化分解和脱水反应；三是降低反应温度。纳米粒子作为催化剂必须满足上述的条件。纳米粒子的催化作用不仅表现为高活性，而且还提高了化学反应的选择性。

（2）半导体纳米粒子的光催化 半导体的光催化效应是指在光的照射下，价带电子跃迁到导带，价带的孔穴把周围环境中的烃基电子夺过来，烃基变成自由基，作为强氧化剂将酯类进行如下变化：酯→醇→醛→酸→ CO_2，完成了对有机物的降解。纳米半导体比常规半导体光催化活性高得多。最近十几年来，半导体光催化在应用中得到飞快的发展。

常用的光催化半导体纳米粒子有 TiO_2（锐铁矿相）、Fe_2O_3、CdS、ZnS、PbS、PbSe、$ZnFe_2O_4$ 等。主要用处：将这类材料做成空心小球，浮在含有有机物的废水表面上，利用太阳光可进行有机物的降解。美国、日本利用这种方法对海上石油泄漏造成的污染进行处理。采用这种方法还可以将粉体添加到陶瓷釉料中，使其具有保洁杀菌的功能，也可以添加到人造纤维中制成杀菌纤维。锐钛矿白色纳米 TiO_2 粒子表面用 Cu^+、Ag^+ 离子修饰，杀菌效果更好。这种材料在电冰箱、空调、医疗器械、医院手术室装修等方面有着广泛的应用前景。

（3）纳米金属、半导体粒子的热催化 金属纳米粒子十分活泼，可以作为助燃剂在燃料中使用；也可以掺杂到高能密度的材料，如炸药，增加爆炸效率；或者作为引爆剂进行使用。为了提高热燃烧效率，将金属纳米粒子和半导体纳米粒子掺杂到燃料中，以提高燃烧的效率，因此这类材料在火箭助推器和煤中作助燃剂。目前，纳米 Ag 和 Ni 粉已被用在火箭燃料作助燃剂。

3. 陶瓷增韧

用纳米粉体进行烧结，致密化的速度快，还可以降低烧结温度。用流延法初步制备的添加纳米氧化铝的基板材料，粗糙度大大降低，冷热疲劳、断裂韧性提高了将近 1 倍，热导系数比常规氧化铝的基板材料提高了 20%，显微组织均匀。例如，通过纳米陶瓷研制结果观察到纳米级 ZrO_2 陶瓷的烧结温度比常规的微米级 ZrO_2 陶瓷烧结温度降低了 400℃。

陶瓷材料在通常情况下呈脆性，由纳米粒子压制成的纳米陶瓷材料有很好的

韧性。因为纳米材料具有较大的界面，界面的原子排列相当混乱，原子在外力变形的条件下很容易迁移，表现出甚佳的韧性与延展性。

4. 光学应用

（1）红外反射材料　由金超微粒子沉积在基板上形成的膜可用作红外线传感器。金超微粒子膜的特点是对可见光到红外光整个范围的光吸收率很高。另外，纳米微粒的膜材料在灯泡工业有很好的应用前景。

（2）优异的光吸收材料　纳米微粒的量子尺寸效应等使它对某种波长的光吸收带有蓝移现象。纳米微粒粉体对各种波长光的吸收带有宽化现象。纳米微粒紫外吸收材料就是根据这两个特性制成。

（3）隐身材料　“隐身”是指把物体伪装起来不易被发现。纳米磁性材料，特别是类似铁氧化的纳米磁性材料放入涂料中，既有优良的吸波特性，又有良好的吸收和耗散红外线的性能，加之密度小，在隐身应用上有明显的优越性。纳米级的硼化物、碳化物，包括纳米纤维及纳米碳管在隐身材料方面的应用也将大有作为。

由于纳米微粒尺寸远小于红外及雷达波波长，因此纳米微粒材料对这种波的透过率比常规材料要强得多，这就大大减小了波的反射率，使得红外探测器和雷达接收到的反射信号变得很微弱，从而达到隐身的作用；另一方面，纳米微粒材料的比表面积比常规粗粉大 3 ～ 4 个数量级，对红外光和电磁波的吸收率也比常规材料大得多，这就使得红外探测器及雷达得到的反射信号强度大大降低，因此很难发现被探测目标，起到了隐身作用。

5. 医学应用

21 世纪是生物和医药研究突飞猛进的年代，纳米技术的学科交叉性特别明显，在新的生物材料、生物活性分子的有效传递，纳米级敏感和传感系统等方面将会取得突破性进展。纳米粒子可进入血液循环中，清除血管内血栓及动脉血管壁上的斑块，防止心、脑梗塞；还可用于治疗胆道泌尿系结石症；也可击碎痛风尿酸结晶，再让血流清除碎片，可在一定时间内减轻疼痛，缓解患者痛苦。纳米粒子还具有靶向、缓解、高效、低毒特性，且可实现口服、静脉注射及敷贴等多种给药途径等，因而使其在药物输送方面具有广阔的应用前景。

纳米材料在骨组织工程中也具有广阔的应用前景。纳米材料在骨科的应用主要体现在骨组织工程中用于骨缺损时作为细胞外支架材料和骨折的固定材料，也有制作成人工关节、韧带和肌腱等的报道。

6. 环保应用

纳米材料对各个领域都有不同程度的影响和渗透，特别是纳米材料在环境保护和环境治理方面的应用，给我国乃至全世界在环境污染治理方面带来新的机会。

纳米级稀土钙钛矿型复合氧化物 ABO_3 对汽车尾气所排放的 CO、NO 和 HC 具有良好的催化转化作用。近年来，很多稀土钙钛矿型复合氧化物已经投放应用于汽车尾气的治理。纳米 ZnO 作为功能材料也具有优异的性能，在环境保护和治理方面同样显示出广阔的应用前景。

随着纳米材料和纳米技术基础研究的深入和实用化进程的发展，纳米材料在环境保护和环境治理方面的应用显现出欣欣向荣的景象。

第 2 章　国外纳米功能材料发展现状

2.1　纳米功能材料科技与产业规模

2.1.1　纳米科技发展现状

1. 纳米技术发展史

1959 年 12 月 29 日，美国著名物理学家理查德·费曼作了著名的演讲“There is plenty of Room at the Bottom”。他在演讲中作了一个很大胆的预测：我们未来只需要 127 μm 大小灰尘尺寸的原子，就可以把世界所有的书籍里面的信息都储存起来，而这么大的灰尘我们只能勉强用肉眼看见。他提到了微观尺度下移动和控制原子的可能性，并预测了实现这一可能的工具以及实验方法。费曼的演讲是近代科学史上人类首次设想并预测纳米科技。

而真正做到在纳米尺度下观察和操作原子，则要追溯到 20 世纪 80 年代。1981 年，扫描隧道显微镜的发明标志着人类可以直接观察纳米世界，从而正式打开纳米科技的大门；1989 年，美国 IBM 公司唐·艾格勒博士实现了人类历史上首次使用扫描隧道显微镜操纵原子；四年之后的 1993 年，中国科学院的科学家们同样操作硅原子写出了“中国”两字，这是世界上最小的汉字。

1984 年，德国物理学家 H·格兰特教授领导的研究组成功研制出一种黑色纳米金属粉末，并用实验证明任何金属颗粒在纳米尺度时都呈黑色，纳米固体材料随之诞生。1991 年，日本 NEC 公司的饭岛澄男发现了一种重要的纳米材料 —— 碳纳米管。2004 年，英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·海姆和康斯

坦丁·诺沃肖洛夫成功地在实验中从石墨中分离出石墨烯，而证实它可以单独存在，两人也因“在二维石墨烯材料的开创性实验”，共同获得 2010 年诺贝尔物理学奖。

1990 年 7 月，第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩召开，正式提出了纳米生物学、纳米材料学、纳米电子学等一系列概念，从而引发了全世界研究纳米技术的热潮。2000 年美国开始实施国家纳米技术计划，次年日本在国家基础技术计划中把纳米列为重点战略学科，标志着全世界范围内大规模研究纳米技术的开始。

纳米材料的研究大致可以分为四个阶段：

第一阶段（1977—1990 年）：以在美国巴尔的摩召开的第一届国际纳米科学技术会议为标志，正式宣布纳米材料科学为材料科学的一个新分支。

第二阶段（1990—1994 年）：以第二届国际纳米科学技术会议为标志，会议认为纳米科学应该着眼于不同种类纳米材料的具体描述。

第三阶段（1994—2001 年）：纳米技术开始遵循人的意愿，用纳米颗粒、纳米丝、纳米管为基本单元组装纳米体系。

第四阶段（2001 年至今）：以美国国家纳米计划的开展作为标志，碳纳米管、石墨烯等新型纳米材料的大规模应用研究，标志着纳米技术进入了国家计划研究和快速发展阶段。

2. 纳米科技研究现状与科研投入

从 20 世纪 80 年代纳米技术兴起至今，纳米学科已经发展为包括由纳米材料学、纳米生物学、纳米医学、纳米化学、纳米电子学等多种方向交叉的新兴学科。在以美国国家纳米计划为首的一系列国家级纳米研发计划促进下，纳米学科已经成为世界范围内最具竞争力的学科之一。

在这 20 多年的发展中，纳米技术从无到有，其工业和技术应用的可行性与社会重要性已经得到广泛认可。在应用上，纳米产品实现了从单纯利用纳米结构作为材料成分向主动改变纳米结构以及纳米器件的转变。在方法和工具上，单原子以及单分子表征方法已经出现，研究人员已经能以前所未有的方法探测复杂的纳米结构动态特性。同样在安全和可持续发展问题上，新的纳米材料不仅降低了环境危害系数，同时也将帮助人们解决环保问题。

在科研成果方面，图 2-2-1 列出了 2005—2013 年在 SCI 发表的纳米功能材料论文数。可以看出，除了在 2009 年发表论文数稍有回落以外，每年发表的有

关纳米技术的论文数均呈上升趋势。从发表论文的国家分布（图 2-2-2）看，美国（981 篇）和中国（787 篇）发表的纳米技术相关论文最多，日本（390 篇）、德国（287 篇）、印度（218 篇）、韩国（213 篇）等国依次位居其后。

图 2-2-1　2005—2013 年平均每年纳米功能材料论文发表数

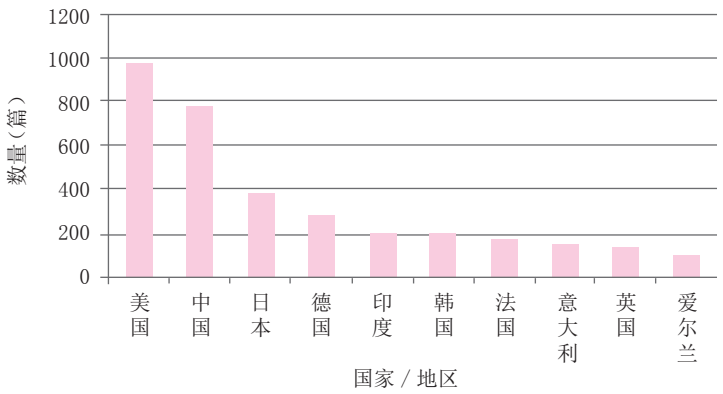


图 2-2-2　主要国家及地区论文发表情况

在科研投入方面，世界各国都制定了自己的纳米研发战略和经费投入计划。自美国国家纳米技术计划以来，全世界陆续有 60 多个国家和地区实施了相关的纳米研发投入计划。根据世界前沿技术研究和技术信息供应商 Cientifica 在 2011 年发布的报告，当年世界各国政府对纳米技术的研发投资约为 100 亿美元，且近来年均涨幅达到 20% 以上，其中美国用于纳米技术的投资为 21 亿美元。图 2-2-3 展示了 2000—2015 年各国纳米技术投资及预测情况。

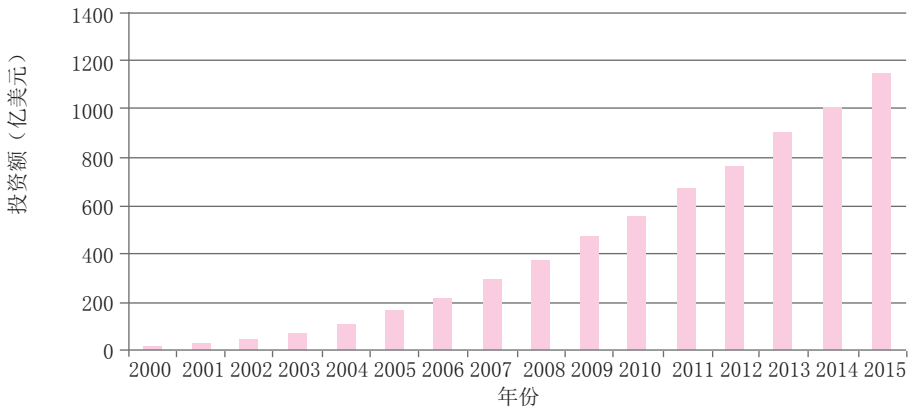


图 2-2-3　2000—2015 年各国纳米技术投资及预测

资料来源：中国科学院科学传播中心。

2.1.2　纳米技术应用潜力预测

从科技发展历史来看，新技术往往需要新材料的支持。随着纳米科技方法和纳米科技产品逐渐渗透到人类生产生活的各个角落，崭新的纳米技术必将在不远的将来改变传统产业甚至是创造出新产业，在未来经济中发挥越来越大的作用，从而极大地改变人类的经济、社会、文化等各种形态发展，其应用潜力不可估量。

1. 医疗领域：精确至细胞级别的治愈能力

当今社会现代医学已经进入了一个发展瓶颈区，疾病治疗方法有待新的突破。以最困扰人们的癌症为例，传统的放、化疗方法在治疗的同时也在严重伤害着人的身体健康，目前没有更好的方法代替放、化疗，其最主要原因就是癌症细胞的隐蔽性和易扩散性。利用纳米技术的微观优势，科学家们已经研制出“纳米生物导弹”，可以将抗肿瘤药物连接到磁性超微粒子上，从而定向射到癌细胞上以实现准确治愈的效果。除此以外，科学家们甚至预测可以使用纳米技术对人体细胞进行基因修复，从而达到根治某些遗传病的目的。运用纳米技术，同样也可以协助人体细胞自我修复，纳米级改进植入组织表面，可以预防移植后的排斥反应。治疗心血管疾病的纳米机器人同样也可以进入人的血管和心脏中从而完成目前尚不能做到的血管修补。纳米技术的发展，在提高人类健康水平和生活质量方面拥有不可限量的潜力。

2. 机械制造领域：制造更精细的材料零件

随着机械技术的不断发展，具有较高误差的传统宏观制造工艺已经越来越不能满足市场的需求。传统宏观技术由于还局限于宏观观测层面，提高材料的制备

精度受到了很大的限制。而纳米技术的发展让人类具备直接从原子层面观察、测绘甚至改造物质材料基本结构的能力。如今人们已经能够做到小范围内直接控制原子排列：IBM 公司在 20 世纪 80 年代用扫描隧道显微镜操控氙原子排列成字母；1993 年中国科学院科学家通过移动单个硅原子写出世界上最小的“中国”二字。随着纳米技术持续发展，未来人们可以进一步控制纳米颗粒的尺寸、表面、形状和微型结构，从而使制备出的材料更加精细。届时，精细度达到原子大小的机械零件也并非不可能。更精细的材料、细致的机械结构，伴随而来的可能是前所未见的机械新特性。

3. 电子产品：更加微型快速化发展

目前，工业级半导体芯片的加工尺寸已经达到纳米级别。以 Intel 公司为例，2013 年推出了基于 16 纳米制造技术的 P1272 芯片。考虑到在这个级别尺度下量子效应越来越大的影响，传统芯片制备工艺已经接近了设计极限，更小尺寸的芯片由于量子效应的影响，已经很难获得应有的性能。因此，改变传统芯片，为其设计新种类的零件也成为电子流域的难题之一。这需要着重研究纳米尺度的物理学，随之而来的纳米电子学着重于微观领域，使用纳米理论改造微电子系统，并开发物质潜在的储存和处理信息能力。而未来采用纳米技术发展的新型微型晶体管和存储器芯片将使计算机的速度和效率在现有基础上再提高几个数量级，在不远的未来计算机信息采集和处理能力必将得到革命性的突破。

目前，人们利用纳米电子学技术已经成功研制出各种新型纳米电子器件，其中最为突出的是石墨烯和碳纳米管，纳米技术在电子产品领域有很好的应用前景。

4. 军事领域：更加强大的国防能力

纳米材料的优良性能使其在军事领域同样也能大显身手。相同体积的纳米材料对比一般材料，其强度和韧性均有很大的提高。以碳纳米管为例，与钢筋材料相比，抗拉强度达到 50 ～ 200GPa，是钢的 100 倍，密度却只有钢的 1/6，并且同样也具有较好的稳定性。因而纳米技术的发展会使得科学家与工程师设计出强度更高、质量更轻、稳定性更好而又廉价的纳米材料，应用于武器、基站等军事设施的建造。纳米技术的应用必将导致未来军事和战争形态的全面改变，不仅仅是军事材料的变革，纳米微型机器的研究将使未来战争格局向微型化、快速化发展。

随着我国经济的不断发展，国防的投入也在不断加大，2014 年我国国防经费达到了 1 320 亿美元。而我军新阶段离完全信息技术化还有很大差距。未来十

几甚至是几十年内，纳米技术在我国国防事业有着深远的市场潜力。

作为 21 世纪的关键技术之一，纳米技术已经并且正在以空前的影响力改变着人类的生产和生活方式，其应用和市场潜力不可估量。

2.2 各国纳米功能材料现状

2.2.1 美国：纳米技术研发与国家计划同行

美国在纳米技术应用与研发方面走在世界的最前沿。美国物理学家、诺贝尔物理学奖得主理查德 . 费曼预测：未来的某一天人类能够在小尺度下操运和控制物体，甚至可以制造出微型计算机。他指出，如果他的假设有朝一日能够实现，必然会有一系列的原子级观测设备问世。如今，费曼先生预言的观测仪器已经问世。这些仪器包括扫描隧道显微镜、原子力显微镜和近场磁力显微镜，它们为测量和操纵纳米结构提供了“眼睛”和“手指”。

纳米工具与科技的极大进步在科学界引起轰动，微观尺度下材料的新特性所带来的极大发展机遇引起了美国的极大重视。IBM 的前首席科学家约翰 . 阿姆斯特朗在 1991 年写到：“我相信纳米科学和技术将会是下一个信息时代中心，就像在 70 年的微米引起的革命一样”。同年，美国政府正式将纳米技术列为“国家 22 项关键技术”和“2005 年战略技术”。1997 年，美国国防部把纳米技术提高到战略研究级别。2000 年 1 月 21 日，美国时任总统克林顿在加州理工学院宣布正式启动国家纳米技术计划（NNI），标示着美国全面推进纳米技术研发时代的到来。

1. NNI——纳米研究的奇迹

美国纳米研发计划要晚于日本，但是比后者取得了更为显著的成效，这与 NNI 是分不开的。

美国 NNI 从 1996 年开始跨部门之间讨论、论证、立项到实施经历了几年的过程。1996 年，联邦机构的几家代表决定定期举行会议讨论纳米科学和技术问题。这一小组到 1998 年被白宫科技政策办公室下面的国家科学技术委员会 (NSTC) 正式指定为纳米技术跨部门工作组 (IWGN)。IWGN 为美国最终制定国家纳米技术计划做了很多铺垫工作。由该小组 1999 年 8 月完成的纳米科学技术草案，经总统科学技术委员会和白宫科技政策办审批后，于 2001 年递交美国国会申请预算。克林顿政府将纳米科学和技术提升为国家级计划，官方冠名为国家纳米技术计划 (NNI)。

根据 NNI，美国联邦政府将长期扶持纳米研究，以期在材料与制造业、纳米电子、医药保健、环境、能源、化学、生物技术、农业、信息技术、国家与国土安全等领域取得突破。联邦政府还将在纳米技术的基础研究方面投入巨资，以期解决基础研究和应用开发脱节的问题。自 2001 年第一年拨款 5 亿美元至今，美国 NNI 已经累计投入逾 200 亿美元。

2003 年，布什政府给 NNI 设定了九大挑战性任务：①设计出更牢固、更轻、更坚硬、自修复、更安全的纳米结构材料；②纳米电子学、纳米光电子学、纳米磁学的知识创新；③先进保健、治疗法和诊断；④用于改善环境的纳米技术应用；⑤高效节能与储能；⑥微型航天器太空探测及其产业化；⑦用于传染性疾病和探测生物威胁的生物纳米传感器；⑧经济和安全交通上的应用；⑨国家安全，与本土防务有关的工作，包括化学、生物、辐射以及爆炸监测和预防。这些重大挑战中的很多项目与参与 NNI 不同机构的使命吻合。

目前，NNI 的战略目标和投资项目主题领域主要包括八个方面：①纳米现象与过程的基础研究；②纳米材料；③纳米器件与系统；④纳米技术仪器仪表研究、计量和标准；⑤纳米制造；⑥主要研究设施和仪器仪表的采购；⑦环境、健康与安全；⑧社会与教育。

NNI 的目标是掌握和控制纳米尺度上的物质，为社会发展带来一场技术和产业革命。为了实现这一大目标，2014 年 NNI 列出了四个具体目标：①推进一个世界级的纳米技术研究和发展项目；②促进新技术向商业产品和公用产品的转移；③发展和维持推动纳米技术发展的教育资源、熟练劳动力、动态基础设施和工具；④支持纳米技术的可靠发展。

2. 发展与监管并存

在 NNI 高速发展、纳米研究不断发展的同时，美国并没有放弃对纳米安全伦理问题的重视。NNI 启动的最初几年，对环境、健康与安全风险（EHS）方面的投入不大，这引起了公众与美国国家研究理事会审查委员会的严厉批评。作为回应，从 2010 年开始，NNI 发布经过修改的 EHS 研究战略计划，将 EHS 的研究经费提高至 9 200 万美元。

在 NNI 以外，美国高度重视对纳米研究的外部监管。目前，美国对纳米实行监管的机构包括环境保护局、食品药品管理局和疾病预防控制中心。与此相对应的是各种对纳米材料实行监管的法律法规，包括《有毒物质控制法案》《职业安全与健康法案》《纳米技术进步和新机会法案》《2010 纳米技术安全法案》等。

大量的投资与严格的控制管理，共同促进了美国纳米技术研究的不断进步。

2.2.2 日本：纳米基础研究与应用研究相结合

日本是世界上开展纳米技术基础研究和产业应用研究最早的国家。早在1981年，日本科学技术厅（现为文部科学省）就已推出“先进技术探究计划”（Exploratory Research for Advanced Technology，简称ERATO），在实施的ERATO前沿基础研究项目中，绝大部分项目与纳米相关，包含了纳米材料学、纳米分子学、纳米电子学、纳米加工、纳米结构等纳米技术的前沿课题。在美国NNI开展以前，ERATO一直都是世界最领先的纳米研究计划。从1981年ERATO创立开始至2000年美国NNI计划开展以前，ERATO一共发表了9 000多篇纳米技术领域的学术论文，其中在英国《Nature》杂志上发表30余篇，发表专利1 500余项。从1991年起，日本通产省（现经济产业省）先后实施了数个有关纳米技术的大型十年计划，每项计划投资均在数千万甚至数亿美元以上。

2000年美国宣布的NNI及其带来的美国纳米技术快速发展给了日本很大的冲击。日本的纳米技术权威学者川合知二认为：美国NNI是在日本最得意的领域发出对日本人的挑战，受此影响，日本各界舆论纷纷要求制定纳米科技发展战略。在危机感压迫下，日本政府于同年12月出台了《纳米技术战略报告书》。在2001年6月制定的第二个五年（2001—2005）科技基本计划中，日本重新将纳米技术确定为八个重点领域之一，并且纳米技术被放在了重中之重的位置。

在2006年3月日本政府发布的第三期科技基础计划中，纳米技术与材料作为重点占据了62项战略重点科学项目中的10项：①解决洁净能源成本大幅度降低的材料技术；②解决资源问题中最关键的稀少资源及不足资源的替代能源创新技术；③支撑安全舒适生活的创新纳米技术与材料技术；④以改革创新为核心的新型材料技术；⑤突破设备性能界限的尖端电子学；⑥实现超早期诊断与微创治疗一体化的尖端纳米生物医疗技术；⑦纳米技术社会接受能力的研究开发；⑧改革创新中纳米技术实用化的先导研发；⑨纳米领域最尖端的测量与加工技术；⑩X射线自由电子激光开发。

除了政府制定国家纳米计划以外，在日本企业是发展纳米技术的主力军。日本的80余家大企业中，有大约40%的企业设置了专门机构发展这一高新科技。三菱、伊藤忠和丸红等综合商社已经同美国的风险企业设立合资公司，把纳米技术列为新的发展项目。富士通公司设立了纳米技术研究中心，住友电工公司也组织了纳米技术研究班子。日本企业首先集中科研力量加强纳米技术开发；其次，

纷纷建立专门从事纳米技术研究或专门生产纳米材料的分厂、分公司，并且日本的企业在纳米技术研发上与广大高校有着密切的合作。

必须要指出的是，日本纳米领域研究开发实力虽然居世界领先地位，但是目前仍未脱离基础和应用研究阶段，距离实现产业化与实用化尚有一段距离。这背后的深层原因是法律法规滞后、风险投资企业环境不成熟等。

2.2.3 欧盟及其成员国

1. 欧盟：在科技框架计划中推进纳米技术发展

欧盟也是几个较早大力推广纳米技术的地区之一。在推广其科研计划的过程中，欧盟启用“欧盟科技框架计划”，由欧盟委员会实施和管理，同时协调和推进各成员国的科研计划。早在第四框架计划（1994—1998 年），欧盟就开始重视并资助了大量纳米技术项目，该计划中 80% 的项目与纳米技术有关，欧盟每年在纳米技术领域的投资达到 3 000 万美元以上。在第五框架计划（1998—2002 年）中，欧盟继续资助并加大了在纳米技术领域的投入。在 NNI 成立以后的第六框架计划（2002—2007 年）中，欧盟改变了对纳米技术研发的策略，不仅仅单纯地资助纳米学科，同时将纳米技术与科学作为欧盟各成员国优先重点发展领域之一。

在欧盟第七科技框架计划中（2007—2013 年），欧盟投资 501.82 亿欧元用于资助六大领域，其中国家合作领域的投资额高达 322 亿欧元，占据了欧盟 60% 的资助经费。而纳米技术作为国家合作领域的十大主题之一同样也备受关注，其经费投入达到 34.75 亿欧元。

在欧盟第七科技框架计划中，欧盟在纳米技术领域的投入旨在提高欧洲纳米工业的竞争性，并且用纳米技术将欧洲的工业由资源密集型转变为知识密集型；在发展纳米技术的同时，通过加强纳米技术与其他工业领域的交流合作来实现整个欧洲工业的阶梯式发展。

2013 年 12 月 11 日正式启动“地平线 2020”（2014—2020），其宗旨是：帮助科研人员实现科研设想，获得科研上新的发现、突破和创新；促进新技术从实验室到市场的转化。预算总额 770 亿欧元，比第七研发框架计划增长近 50%。到 2020 年，欧盟研发与创新投入要占欧盟总财政预算的 8.6%。

“地平线 2020”要求欧盟所有的研发与创新计划聚焦于三个共同的战略优先领域，其中工业技术领域的行动计划 —— “在使能技术和工业技术中保持领军地位（LEIT）：信息通信技术、纳米技术、材料、生物技术、制造技术、空间

技术”，预算金额 135.57 亿欧元，占比 17.6%。

2. 德国：纳米倡议—行动计划

早在 20 世纪 80 年代，德国就推行了“纳米生物技术计划”“材料研究与物质技术计划”等与纳米技术相关的计划。为了追赶处于领先地位的美国，德国联邦教研部在 2007 年启动了“纳米倡议—行动计划 2010”，旨在协调德国各部门纳米技术的目标和行动计划并推进德国在纳米技术领域的创新。

2010 年德国政府用于支持纳米技术项目和机构的资金达 4 亿欧元，比 2006 年增长 50% 以上，而在同一时期用于纳米安全和风险的研究资金增加超过 70% 以上，达到 1.4 亿欧元。

2011 年，为了衔接“纳米倡议—行动计划 2010”，德国政府颁布了“纳米技术行动计划 2015”，帮助德国扩大自己在欧洲纳米技术领域的领先优势。该计划中包含与纳米技术相关的各种广泛领域，除了继续对中小企业和企业家的科研项目予以经费支持外，还包括安全和监管问题以及与公众对话等内容。“纳米技术行动计划 2015”主要包括以下 6 个行动领域：①研究资助和技术转让，侧重于高科技战略需要的领域，如气候/能源、健康/营养、运输、安全性和通信等；②确保德国纳米技术的竞争力，重点扶持中小企业和资助新成立的企业；③纳米技术对于人类和环境的危害性，通过研究，以及在环境、消费者和劳动保护方面的行动将其纳入重点；④完善总体框架，包括法定规章的调整，标准和标准化的问题等；⑤与公众更深入的沟通和对话；⑥通过国际合作，巩固德国在纳米科技领域的领先地位。

德国同样也重视纳米技术的安全性问题。2013 年，德国联邦环境部、德国联邦职业安全和健康研究所、巴斯夫研究所联合推出长期的安全性研究项目，拟探讨纳米粒子对肺部的潜在慢性影响。研究计划拟在四年内完成，项目总经费预计投入 500 万欧元。

3. 英国：国家纳米计划与先进材料战略并行

英国是世界上最早实行国家纳米计划的国家之一。早在 1986 年，英国政府就启动了英国国家纳米计划，目的在于促进英国纳米技术发展。2004 年英国皇家学会发表的研究报告《纳米科学与纳米技术：机遇与不确定性》成为纳米技术方面国际公认的权威报告。2006 年，英国政府推行先进材料战略，将纳米材料作为先进材料的一个重要领域。

2010 年 3 月英国政府最新出台的纳米技术战略中，除强调纳米技术研发与

创新以外，将纳米技术可能带来的环境、健康危害与风险也提上议程，开始重视纳米技术引发的伦理和社会问题。为达到这一目的，英国政府已经确定采用各种商业、产业、环境安全法规来监督纳米技术的安全合理发展。

第 3 章　我国纳米功能材料科技与产业发展现状

3.1　我国纳米功能材料科技与产业规模

随着纳米科技以及纳米材料产业的快速发展，未来纳米技术将对生产生活产生重大影响，成为推动世界各国科技创新、产业结构调整以及经济社会持续健康发展的重要力量。纳米功能材料在信息、新能源、节能环保、生物医药等领域巨大的应用潜力，将对促进我国经济结构调整和传统产业改造升级发挥重大作用。在国家颁布各项支持政策和市场规模逐步扩大等利好产业发展的环境下，企业也越来越重视纳米技术，在科技界和企业界的共同努力下，我国纳米材料产业化步伐明显加快。

在我国发展创新型经济的要求下，为促进经济结构调整与产业升级，我国许多省市把新材料产业作为推动区域经济跨越式发展的重点产业。目前我国已形成三大纳米材料及纳米技术产业带：北京、上海和深圳（图 2-3-1）。

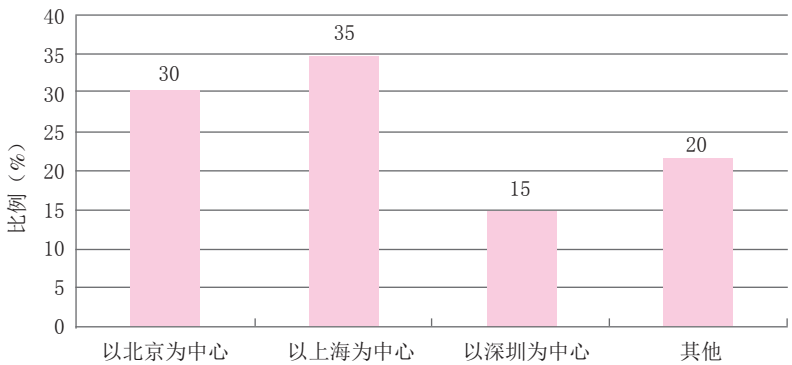


图 2-3-1　我国纳米材料产业分布情况

北京市、上海市、江苏省、浙江省、广东省等纳米功能材料产业化发展位居前列的省市结合各自在纳米功能材料方面的产业优势，制定符合本地区实际的新材料科技与产业发展规划并出台配套的产业政策，有力地促进了纳米功能材料的产业化发展。

3.1.1 北京市纳米功能材料产业发展状况

纳米材料是当今新材料领域中研究最为活跃的板块，其应用将对未来经济和社会发展产生重大影响。北京市在纳米材料领域具有突出的人才、成果与资源优势，以及良好的产业化基础。2012 年 4 月，由北京市科委和怀柔区政府共建的北京纳米科技产业园在雁栖经济开发区揭牌。2013 年 9 月，北京纳米科技产业园被科技部认定为“北京国家纳米高新技术产业化基地”。随着相关基地和产业园区的日渐成熟，纳米材料产业将具有广阔的发展空间。

2012 年北京纳米材料相关企业已经超过 30 家，年产值约 30 亿元，预计到 2015 年纳米材料产值将超过 60 亿元。2012—2015 年北京纳米材料产业产值如图 2-3-2 所示。北京纳米科技产业园在纳米膜材料、纳米材料绿色印刷等领域的发展初具规模，形成了优势突出、特点鲜明、技术领先、前景广阔的产业板块，并且拥有了北京中科纳新印刷技术有限公司、北京碧水源膜科技有限公司、有研粉末新材料（北京）有限公司、北京中科纳通电子技术有限公司等一批纳米细分领域龙头或优势企业。

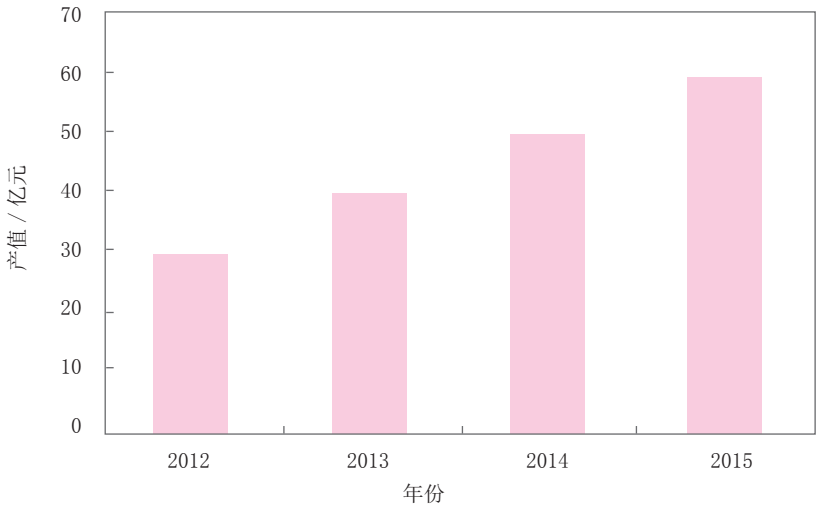


图 2-3-2 2012—2015 年北京纳米材料产业产值

北京中科纳新印刷技术有限公司成立于 2009 年 11 月 20 日，是由中科院化学所、联想投资、联想控股等著名科研机构和企业共同发起成立的新技术企业，主要从事纳米材料绿色制版技术的研发。这是一种非感光、无污染、低成本的新型快速印刷制版技术，有望解决我国印刷制版行业的污染和资源浪费问题，提升我国印刷行业的竞争力。

北京碧水源膜科技有限公司创建于 2006 年，是专业从事膜材料制造、膜设备制造和膜技术研发与技术服务的国家高新技术企业，研发出拥有完全自主知识产权的增强型微 / 超滤膜（PVDF、PVC、PES 等）、低压反渗透膜以及高效低耗能膜生物反应器（MBR）技术，已形成年产 400 万 m^2 微滤膜（用于污水处理）和 150 万 m^2 超滤膜（用于自来水深度处理）以及相应膜组器规模化生产线，年产 200 万 m^2 反渗透膜生产线（用于海水、苦咸水淡化等）正在建设中。

3.1.2 上海市纳米功能材料产业发展状况

上海工业基础雄厚、科技资源密集、综合实力领先，发展纳米产业具有比较大的优势。上海很早就积极部署发展纳米产业，已成为我国发展纳米产业的一支重要力量。

上海纳米产业体系发展比较健全，产学研合作密切，各种科研和产业交流合作平台健全。2001 年上海市纳米科技与产业发展促进中心成立，主要负责完善产、学、研、用长效协作机制，整合各种资源，推进上海纳米科技与产业化的工作。2003 年 10 月纳米技术及应用国家工程研究中心在上海成立，中心专门从事纳米技术研发、工程化应用、技术集成和成果推广，致力于纳米功能材料在环境、生物医药、新能源、信息技术等领域的应用研究与开发，推动科研成果放大以及产业化，搭建产业与科研之间的“桥梁”。

上海已经在纳米技术产业的若干领域形成大规模生产的能力，并取得自主知识产权。纳米功能材料产业链已具雏形，纳米改性复合材料、纳米涂层等产品的高附加值效应已经渗透到机械、电子、纺织、能源、环保等多个领域，有力地改造和提升了传统产业，促进了经济增长方式的转变。由上海东华大学完成的一个项目，将前沿纳米技术与新型纤维加工技术有机结合，首次实现了高聚物基纳米复合功能纤维的产业化，对提升我国纺织产业核心竞争力具有积极意义。

上海交友钻石涂层有限公司拥有世界领先的 CVD 金刚石涂层技术，其研发的金刚石涂层中的金刚石晶粒尺寸为纳米级。金刚石涂层应用在各种拉拔、冲压模具的工作面上，提高了产品质量和模具寿命，产生了巨大的经济和社会效益。纳米金刚石复合涂层已经广泛应用于电力、通信、建材、机械加工等行业所需的拉拔模具和耐磨器件，具有广阔的市场应用前景。该产品已在江苏上上电缆集团有限公司、上海华普电缆有限公司等逾 70 家生产企业应用，为应用企业带来了显著的经济效益。截至 2013 年，上海交友钻石涂层有限公司已在国内拥有 600 多家客户，在国际拥有约 100 家客户。

上海六立纳米材料科技有限公司是专门从事抗菌防霉等新功能纳米材料的研发、生产、销售和应用技术服务的高科技民营企业，在国内新功能纳米材料的研发、纺织和高分子材料的应用领域具有领先优势。公司目前拥有“6S”品牌的纳米粉体、纺织整理剂、塑料母粒三大领域的众多新功能产品，如抗菌、防霉、抗紫外、抗静电、负离子、远红外、疏水疏油、易去污、吸湿排汗等新功能粉体产品，广泛应用到塑料、化纤、橡胶、海绵、针纺织品、无纺布、纸制品、化妆品、涂料、陶瓷、油墨等领域。应用新功能纳米材料的产品主要出口到美、日、德、澳等国家，具有非常良好的品质保障。

3.1.3 江苏省纳米功能材料发展状况

江苏省纳米材料的创新水平与国际保持同步。纳米材料的产业化发展取得了突出的成绩，在苏州工业园区建设的国家纳米技术国际创新园也快速发展。苏州工业园区于 2010 年开始发展纳米技术产业，至 2013 年年底，园区纳米技术企业从 72 家发展到 222 家，产业产值从 38 亿元发展到 138 亿元，中高端人才也从 2 000 人达到了 8 000 多人，平均增幅 50% 以上（表 2-3-1）。

表 2-3-1 2010—2013 年园区纳米技术应用产业增长情况

指标名称	单位	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
产值	亿元	36	58	90	138
人员	万人	0.50	0.66	0.78	1.20
企业数	家	72	118	166	222

苏州工业园区中的纳米新材料产业涉及国民经济和社会生活中能源、电力、钢铁、化工、农林牧渔等各行业，其广泛应用将对传统产业产生重大影响。主要包括碳纳米材料、纳米能源材料、氮化镓等第三代半导体材料，纳米银、纳米氧化铝等纳米金属材料，纳米功能复合材料以及纳米生物医用材料等领域。

在纳米碳材料领域，苏州工业园区是国内企业集聚度最高、产品种类最全、下游应用衔接最快的区域，也集聚了国内纳米碳材料主要产业化团队和人才。捷迪纳米在碳纳米管阵列生长和纤维仿丝技术、大德碳纳米科技在高质量富勒烯材料宏量制备技术、格瑞丰在高品质石墨烯插层化学制备技术等领域已获得重大突破，技术水平填补国内空白，达到国际水平，具备小批量生产能力，并形成了小规模销售。国内首家碳纳米管触控膜企业——汉纳科技基本完成量产准备，产品得到了产业链下游龙头应用企业华为和意力的应用认可。

在能源材料领域，苏州工业园区集聚了锂离子电池材料和太阳能光伏电池材料企业 12 家。在锂离子电池材料方面，以龙能、恒正、纳新、因迪能源等为代表的企业掌握了纳米多孔结构的磷酸锰锂、纳米钛酸锂等负极材料和纳米三元正极材料的规模化制备技术，纳米级粉体材料无碳合成技术，突破了纳米陶瓷隔膜涂覆工艺，有效解决了电池循环使用寿命和安全性问题，大大提升了锂离子电池的综合性能，填补了国内空白。大部分企业已建成生产线，与国内下游锂电池企业建立了紧密合作关系，部分企业产品产值已超亿元。在太阳能光伏材料方面，集聚了以银瑞光电、柏特瑞新材料、开元民生、福禄（苏州）等导电纳米银浆企业，掌握核心技术，销售额亿元左右。

在纳米功能复合材料领域，苏州工业园区纳微公司的纳米微球和导电金球处于国际领先水平，个别领域已超越竞争对手，并与园区近 30 家光电、生物医药企业形成上下游合作关系，初步形成了纳米有机微球产品应用集群，带动园区下游高新技术产品产值超过 3 亿元。聚宜公司是国内唯一专注于研发和生产纳米结构永久型导电聚合物产品的公司，其技术水平国内领先，市场占有率超过 40%，已在纳米城建立了生产基地。

3.1.4 浙江省纳米功能材料发展状况

为加快纳米材料应用及其产业化发展，促进经济结构调整和传统产业的升级，浙江抓住新一轮科技革命带来的巨大机遇，制定了一系列政策措施加快纳米产业的发展。经过近几年的自主创新和大力推广，纳米新材料技术在浙江省的应用已显现优势，生产规模和应用领域不断扩大，一批纳米产品及其应用技术走在了全国的前列。浙江省已成为我国纳米新材料技术产业化和应用大省，其中纳米粉体材料的产业化走在全国前列。浙江省已形成产业化的纳米粉体材料主要包括：以纳米氧化硅、纳米金刚石、纳米碳酸钙等为重点的非金属纳米粉体材料；以纳米氧化锌、纳米氧化铝、纳米氧化银等为重点的纳米金属氧化物粉体材料；以纳米银、纳米铁、纳米铜、纳米铝等为重点的纳米金属材料。应用领域涉及多个产业。

目前，浙江省逐渐形成了以杭州、宁波为中心的纳米材料及纳米技术产业带。浙江省从事纳米材料生产与应用的企业有 100 家之多，主要集中在涂料、高分子、陶瓷等产业。一批掌握了纳米核心技术的企业走在了全国乃至世界前列。杭州先进碳酸钙化工有限公司为浙江省高新技术企业，专业生产纳米级轻质碳酸钙，年生产能力 2.5 万 t，居全国第一位。研制开发了双级离心碳化法生产工艺，实现了纳米钙的批量生产，其生产工艺属国内首创，技术居国内领先水平。由杭州之

江有机硅化工有限公司生产的纳米密封胶，通过采用有机添加剂、纳米粒子填充体系与复合型催化体系，技术指标达到或超过国际同类产品水平，广泛应用于多种行业，并大量销往国外。浙江天松新材料股份公司开发的纳米材料复合粉末涂料填补了国内精细化工的空白，产品被海尔、长虹、春兰等家电企业应用。

3.1.5 广东省纳米功能材料发展状况

广东省新材料产业具有良好的产业基础，新材料的技术水平与实力位居全国前列。近几年广东省加快发展新材料产业，着力提升新材料产业国际竞争力，促进新材料产业结构战略性调整，有力地促进了新材料产业的发展。广东省重视纳米功能材料的产业化发展，紧紧抓住纳米功能材料产业化快速发展的机遇期，在纳米碳酸钙、纳米稀土功能材料等领域涌现出一批优势企业。

广东嘉维化工集团是一家专业从事纳米碳酸钙研发、生产及销售的综合性大型化工企业，主导产品纳米碳酸钙的产能及销售均居全球首位，主要应用于 PVC 填料、密封胶、橡胶及汽车底盘涂料加工业。嘉维化工采用国际上先进的鼓泡碳酸化工艺流程制备纳米沉淀碳酸钙，兼有运行成本低和产品品质优良的特点，“白樱华”牌纳米碳酸钙系列产品远销国内外。预计 2020 年，集团将实现 100 万 t/a 的产能。

广东瑞尔化学科技有限公司是我国开展稀土纳米材料研发与生产最早的企业之一，技术水平、生产能力领先国内同行。其生产的纳米氧化铈、纳米氧化钇、纳米氧化钕、纳米氧化镧等稀土纳米粉体材料，具有较强的市场竞争力。其产品广泛应用在催化材料、发光材料、晶体材料、精密抛光、润滑抗摩剂、电子陶瓷、电池材料、紫外线吸收、硅橡胶、高分子材料、纺织整理等领域。

3.2 纳米功能材料的主要性能及应用

纳米功能材料本身的结构和特性决定了其具有许多特殊的性质和广阔的应用前景。纳米功能材料现已在信息产业、生物医药、能源环保、航空航天、军事国防等领域得到了广泛的应用。

1. 纳米功能材料催化作用

纳米颗粒的比表面积大、表面活性反应高、表面活性中心多、催化效率高、吸附能力强的优异性质使其在催化方面有着重要的应用。

纳米 TiO_2 可通过光催化降解汽车尾气中的 NOx。钙钛矿以及纳米部分层状复合物都表现出较好的光催化作用，也可以作为纳米光催化材料。

纳米粉体如银、氧化铝和氧化铁等已经直接用作高分子聚合物氧化、还原及合成反应的催化剂，大大提高了反应的效率。

纳米镍粉作为反应催化剂的火箭固体燃料，燃烧效率可提高 100 倍。用硅载体镍催化丙醛的氧化反应，当镍粉的粒径在 5nm 以下时，反应选择性发生急剧变化，醛分解反应得到有效控制，生成酒精的转化效率迅速提高。

2. 纳米功能材料光吸收作用

多种物质对光线都具有屏蔽防护的作用，如氧化铝、氧化镁、二氧化钛、二氧化硅、碳酸钙等，当这些材料制成纳米粉体，微粒的尺寸与光波波长相当或更小时，小尺寸效应导致光吸收显著增强。目前，对紫外线吸收的几种材料有：30 ～ 40nm 的 TiO_2 纳米粉体，对波长 400nm 以下的紫外线有极强的吸收能力；Fe_2O_3 纳米粉体，对波长 600nm 以下的紫外线有良好的吸收能力；Al_2O_3 纳米粉体，对波长 250nm 以下的紫外线有很强的吸收能力。经表面接枝改性后的 C_{60} 有望作为接收太阳能并将之转化为化学能或者其他能量的新型材料，可较为有效地吸收阳光中的主要波长，在太阳能电池等应用领域具有潜在的使用价值。

3. 纳米功能材料的抗红外线作用

纳米微粒用作红外反射材料主要是制成薄膜和多层膜来使用。通常将包含有氧化铝、氧化镁、氧化锌等的粉体称为远红外陶瓷，这些材料对红外线有极强的屏蔽作用。用纳米 SiO_2 和 TiO_2 制成总厚度为微米级的多层干涉膜，衬在灯泡罩的内壁，不但透光率好，而且有很强的红外线反射能力。分析得知，它对波长为 1 250 ～ 1 800nm 的红外线有极强的反射能力。

4. 纳米功能材料在医学上的应用

纳米微粒的尺寸常常比生物体内的细胞、红血球还要小，这就为医学研究提供了新的机遇。目前已得到较好应用的实例有：利用纳米二氧化硅微粒实现细胞分离的技术，纳米微粒，特别是纳米金粒子的细胞内部染色，表面包覆磁性纳米微粒的新型药物或磁靶向药物抗体进行局部定向治疗等。

5. 纳米功能材料在国防上的应用

在雷达隐身技术中，超高频段电磁波吸波材料的制备是关键。纳米功能材料正被作为新一代隐身材料加以研制。纳米粒子的表面原子比例高的特点以及量子尺寸效应使纳米微粒具有良好的吸波能力。科学家正致力于研究可覆盖厘米波、毫米波、红外、可见光等波段的纳米复合材料，并提出了单个吸收粒子匹配设计机理，这样可以充分发挥单位质量损耗层的作用。纳米材料中的硼化物、碳化物、

铁氧体、纳米纤维以及纳米碳管在隐身材料方面的应用将大有作为。

6. 纳米功能材料在能源方面的应用

纳米功能材料在能源方面可应用于锂离子电池负极材料和质子交换膜燃料电池 (PEMFC)。

近几年，碳纳米管在锂离子电池方面的应用得到广大科研人员的关注。碳纳米管的管径仅为纳米级尺寸，管与管之间相互交错的缝隙也仅为纳米级尺寸。碳纳米管这种特殊的微观结构使锂离子的嵌入深度小、过程短，锂离子不仅可嵌入管内各管径、管芯，而且可嵌入管间的缝隙之中，从而为锂离子提供大量的嵌入空间位置，有利于提高锂离子电池的充放电容量及电流密度。碳纳米管这种优异的结构使其成为锂离子电池极好的电极材料。

质子交换膜燃料电池具有高功率密度、高能量转换效率、低工作温度和环境友好的优点，是最有发展前途的一种燃料电池。 目前 PEMFC 使用的催化剂大多是以碳材料如活性炭、炭黑等为载体的铂催化剂，即 Pt/C 催化剂。研究人员开发的浸渍还原法、胶体法等工艺制备的 Pt 晶粒尺寸 3 ～ 5nm，而且晶粒粒径均匀、分散性较好、比表面积大，提高了 Pt 利用率，从而提高了催化剂的活性。

3.3 与纳米功能材料相关的产业政策制定

随着信息、生物医药、航空航天、高端装备制造技术的发展，未来纳米功能材料产业规模会急剧扩大，市场需求旺盛。同时在国务院培育战略新兴产业的决定以及《新材料产业“十二五”发展规划》的推动下，国家将加大对新材料产业的投入，同时也将带动社会资本对新材料产业的投资热潮，新材料产业会发展得更为迅速。作为未来高新技术发展重点的纳米功能材料将会面临巨大的发展机遇。因此，为了抓住发展的重要机遇期和抢占发展的战略制高点，中央政府和地方政府都出台了一系列的政策和措施促进纳米功能材料的发展。各个地方政府结合实际发展状况出台的一系列政策，包括财政税收政策、金融政策、产业发展政策以及知识产权政策等，有力地促进了纳米功能材料领域的企业发展创新。

3.3.1 财政政策

目前，在中央层面建立了稳定的财政投入机制，通过中央财政设立的战略性新兴产业发展专项资金等渠道，加大对新材料产业的扶持力度，开展重大示范工程建设，重点支持填补国内空白、市场潜力巨大、有重大示范意义的新材料产品开发和推广应用。各个地方政府在中央政策的支持下也应加大对新材料产业的财

政投入。不少地方政府设立扶持新材料产业发展专项资金，加大对新材料产业的财政投入。

1. 设立纳米功能材料产业发展专项资金

设立纳米功能材料产业专项资金，通过贷款贴息、补助和奖励等方式，加大对纳米功能材料产业重点领域的技术创新和技术改造力度，对纳米功能材料领域开发的核心技术取得专利、成果实现产业化、市场前景好并获得良好经济效益的技术创新和技术改造项目进行重点支持，加大对新材料的推广应用。

2. 设立纳米功能材料科技创新专项支持资金

支持企业技术创新能力建设和重大产业化项目。设立专项资金用于支持纳米功能材料企业创新能力建设，对研发能力强、成果储备多、在关键性和前瞻性技术和产品研发上成效显著的省级以上重点技术创新平台，及列入国家和省纳米功能材料重大技术创新的专项项目，安排一定数额资金给予奖励；对上下游产品带动作用强、能够实现链式发展的纳米功能材料技术改造项目给予一定数额资金支持。

3. 设立支持新技术新产品推广应用的专项资金

设立专项资金用于支持新技术、新产品推广应用，对具有国内领先和国际先进水平、拥有自主知识产权、市场前景良好、能迅速实现产业化的新技术和产品给予资金奖励；制定和完善纳米功能材料产品标准体系，及时将纳米功能材料的创新优势转变为标准优势，对企业标准采纳为行业标准或国家标准的给予资金奖励。

3.3.2 金融政策

1. 加大信贷支持

提高对纳米功能材料生产企业授信额度，积极为符合条件的新材料生产企业提供信贷支持，特别是对国家和省重大新材料研发和产业化项目，要积极给予信贷资金支持。对获得贷款的企业给予一定额度的贴息补助。对新材料产业实行优惠贷款利率政策，原则上不得上浮。

2. 风险投资支持

设立政府新兴产业基金，引导社会上的风险投资资金重点向纳米功能材料产业倾斜，重点吸引国内外风险投资机构、创业投资机构、民营资本等各类资本投资纳米功能材料企业。对投资于纳米功能材料领域的风险投资机构给予一定的奖励。

3. 鼓励多渠道融资

鼓励和引导社会资金和民间资本加大对纳米功能材料产业的投入。金融机构应开展知识产权质押及股权质押融资，建立风险分担机制。支持企业上市融资，对被认定新完成股份改制的新材料企业给予一定的资助；对在主板、中小板、创业板上市及在全国股份转让系统挂牌的纳米功能材料企业给予一定资助。

3.3.3 产业化政策

1. 完善创新体系 促进自主创新

虽然我国纳米功能材料产业化发展取得了突出的成绩，但是国内很多企业产品与国际同行相比还有一定的距离。企业自主创新能力明显不足，需要提升企业的研发实力，加大企业的人才引进力度，促进产学研紧密合作。鼓励高校和相关企业通过课题研究、共建研发中心等方式开展合作。依托高校的重点实验室以及有实力的科研机构建立公共技术服务平台，加强共性基础核心技术研究。对获得国家级以及省级工程技术研究中心、工程中心、企业技术中心、检测中心、重点实验室的纳米功能材料企业，给予一定资助。鼓励加快产业技术联盟开展关键共性技术的合作研发，推广、应用和保护知识产权，制定和推广技术标准，建立科技资源开放共享平台，设计并实施行业整体解决方案，开展校企合作培养创新人才，吸引创业资本投资，建立产业技术信息和标准信息交流平台，开展国际科技合作与交流等活动。

2. 支持行业龙头企业

积极培育和引进与纳米功能材料产业关联性大、带动性强的大企业集团，发挥其辐射、示范、信息扩散和销售网络的产业龙头作用。引导社会资源向龙头企业集聚，推动龙头企业建立产品标准、质量检测、财务结算机构，提高核心竞争力。鼓励龙头企业采用多种形式，对其上下游配套企业进行重组、改造。发挥龙头企业的集聚带动效应，逐步衍生或吸引更多相关企业集聚。积极引导中小企业提高对大企业的配套能力，延长产业链，夯实产业发展基础。

3.3.4 知识产权保护政策

1. 知识产权保护

组织开展纳米功能材料企业知识产权联盟保护行动，建立知识产权保护平台，创造与国际接轨的知识产权成长和保护的环境，培育一批拥有自主知识产权的知名品牌和知识产权示范企业。

2. 知识产权奖励

纳米功能材料企业当年新获授权的职务发明专利，给予奖励；新获中国世界名牌产品、中国驰名商标、中国名牌、国家质量管理奖的企业，给予一定的奖励；新获中国标准创新贡献奖一等奖、二等奖、三等奖的企业，给予一定奖励；对于承担国际标准化组织相关专业秘书组的企业，给予奖励；对于担任国家专业标准化技术委员会主任单位的企业，给予奖励；对于担任国家专业标准化分技术委员会主任单位的企业，给予奖励；企业标准转化为国际标准的，给予奖励；企业标准转化为国家标准的，给予奖励；企业标准转化为行业标准的，给予奖励。对新获国家级、省级知识产权示范企业或知识产权优势培育企业，给予奖励。

3.4 纳米功能材料科技与产业发展存在的问题

我国纳米功能材料产业经过近几年的发展取得了较大的成绩，但与国外先进水平相比，还有相当大的差距，在产业的发展中还存在着许多问题。

3.4.1 企业自主创新能力有待加强

国内纳米功能材料领域的企业总体技术水平层次不高，许多核心技术与装备都需要进口，部分产品技术含量和附加值不高。部分企业还缺乏战略眼光和超前研究，进入晚、投入少、发展慢，缺乏高层次领军人才支撑，缺乏重大技术突破，只能采取跟随战略，未形成产业优势。企业的二次创新以及集成创新能力不足。部分企业研发的新产品无法进入商业化运营。企业核心竞争力有待加强。

3.4.2 产业发展不平衡

纳米功能材料企业布局较为分散，产业格局尚未形成。纳米功能材料企业还比较分散，聚集度较低，不能形成集群效应。纳米功能材料产品种类较多，涉及信息产业、生物医药、能源环保等多个不同的行业，无论是设备、技术，还是销售市场都存在较大的差异。由于缺乏共同的市场基础，大多数企业间的关联性较差，产业链条发育不完善。大多数企业独立完成生产制造的过程，相互之间关联度不高，特别是行业龙头的大企业和产业链上下游中小企业的合作程度不高，缺乏社会化专业协作。

3.4.3 产学研用结合机制不完善

产学研用相结合的技术创新体系和产业技术联盟发育不够充分，纳米功能材料研究成果产业化机制不尽完善，产业核心竞争力总体不强。表现为科研与产业相脱节，前瞻性领域创新薄弱，缺乏研发方与企业方有效的合作机制，各类服务平台的服务功能不完善，成果转化率低，人才和成果流失严重。产、学、研、用结合的长效协作机制尚需进一步完善。

3.4.4 缺乏纳米功能材料的激励机制

虽然近年来国家及各个地方政府都制定了一系列政策和投入资金支持新材料的发展，但针对纳米功能材料的政策与资金明显不足，缺乏持续的政策支持和稳定的资金投入。

政策方面：由于纳米功能材料相比其他新材料具有的技术含量更高，因此纳米功能材料领域的企业面临着巨大的研发风险以及市场风险。这些特点决定了单纯依靠市场力量难以保证纳米功能材料产业化的发展，离开政府的引导和支持很难实现跨越式发展。新产品进入市场的初期，政府尚需要对纳米功能材料的生产企业给予一些激励措施。

资金方面：中国 80% 以上的新材料企业都是中小型企业。纳米功能材料领域的企业大部分都还处在成长期。相关企业具有很大的发展潜力，但是由于发展初期面临的资金不足的状况而面临巨大的失败风险。因此，需由政府有关部门推动建设一个完善的科技金融服务体系，帮助解决纳米功能材料产业中的创新型企业发展资金不足的问题。

第 4 章　我国纳米功能材料资源潜力分析

4.1　资源开发利用现状

4.1.1　矿物资源纳米化开发利用现状

矿物材料是指天然产出的具有一种或几种可资利用的物理化学性能或经过加工后达到以上条件的矿物。广义的矿物材料还包括一部分由岩石构成或制成的原材料。中国是世界上矿种种类齐全、资源总量丰富的少数几个国家之一，目前已经发现的矿种共有 171 种，已探明矿产资源的总量有 158 种，矿产地包括没有开采的共有 18 000 多处，其中大中型矿产地以上的有 7 000 多处，特别是中国的煤、稀土、钨、矽、钼、锑、钛、石膏、芒硝、磷镁矿、银石、滑石和石墨等矿产资源，在世界上具有明显的优势。

随着纳米科技的日趋成熟，纳米材料已成为材料科学分支中最活跃的领域，传统矿物材料的发展也应该与时俱进，将纳米技术融入矿物材料中，实现矿物材料的纳米化。

纳米矿物材料是指矿物天然的纳米结构特征（颗粒细度在三维空间内至少有一维是纳米尺度）或经过一系列技术手段加工处理后所呈现出的纳米结构特征通

过特定的合成制备技术，与其他原材料经过插层、聚合、组装、复合处理而制成的具有特殊物理化学性质的新材料。

纳米矿物材料可分为天然纳米矿物材料和人工纳米矿物材料。天然纳米矿物材料是指那些天然存在的矿物中存在细小颗粒和孔洞在 1 ～ 100nm 尺寸范围内，比如说一些地区的火山喷发后的火山灰质矿物质，它们的粒度就在纳米范围内，又如大洋中猛结核中含铁矿物，也存在纳米尺度的粒子。人工纳米矿物是以天然矿石为原料，利用纳米技术对矿石的结构进行改造而来，包括多孔化、复合化、掺杂化、薄膜化等。人工纳米矿物的制备原理是利用天然矿物或经过纳米技术改造后所获得的纳米结构特征作为载体，通过插层、聚合、镶嵌、组装等合成纳米复合材料，或将天然矿物的纳米尺寸添加到其他材料中，形成纳米掺杂矿物材料。

目前，纳米矿物粉体材料的制备方法主要分为物理法和化学法，都致力于粉体细化的同时减少团聚，还要获得单分散的纳米粒子。物理法中包括机械粉碎法、机械合金化、高压气体雾化法、高频感应加热法、电子束照射法等。化学法主要分为化学柱撑或无机合成法。纳米矿物材料纳米改造手段主要有插层聚合法、层间化学法、模板反应法、共轭法等。例如，对层间距较大的蒙脱石黏土和高岭土采用离子交换的方法进行修饰和插层处理，对矿物材料进行纳米改造，制备嵌入型或剥离型蒙脱石 / 聚合物纳米复合材料。

1. 石墨资源纳米化开发利用现状

2010 年，英国曼彻斯特大学两位科学家用机械剥离法成功地获得二维碳原子层 —— 石墨烯，石墨烯继零维富勒烯、一维碳纳米管、三维石墨之后，成为石墨家族的新成员，将石墨纳米化又推向一个新的高潮。欧盟和日本、美国等国家都对石墨这一资源重视起来，将其列为高新技术产业的关键矿物原料，除了储备以外，还对石墨资源进行立法保护。我国也对石墨资源的合理化利用出台了一些政策，致力于石墨资源的优化配置，使石墨资源走可持续发展的道路。

制备石墨烯的主要方法有：化学气相沉积法、机械剥离法、氧化还原法等。其中氧化还原法由于成本低、周期短、产量大，是应用最广的石墨烯制备方法，常被应用于石墨烯复合材料的制备。氧化还原法以具有片层结构的石墨为原料，先将石墨进行氧化处理，对表面进行含氧官能团（羟基、羧基、羰基和环氧基）的修饰（图 2-4-1），使石墨片层间距由 0.34nm 增加到 0.8 ～ 1.2nm，削弱了石墨片层间的范德华力，同时由于含氧官能团具有亲水性，使得氧化石墨由疏水性变得具有亲水性，可以稳定分散在水中。然后将氧化石墨在水中以大功率超声，形成稳定的氧化石墨烯片层分散液。但是由于含氧官能团的存在使石墨单片具有

较多的缺陷，大大削弱了导电性，还要根据具体需要将氧化石墨烯还原为石墨烯，常见的方法有化学还原、催化还原、热还原等。

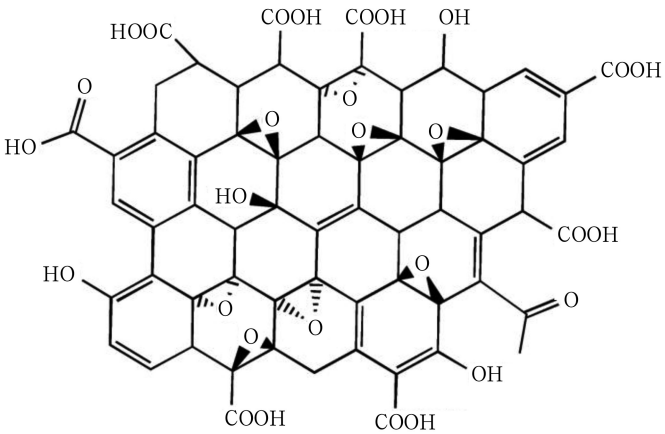


图 2-4-1　氧化石墨烯片层的含氧官能团结构图

以石墨为原料用氧化还原法制备石墨烯的另一个优势就是便于石墨烯的功能化。结构完整的石墨烯是由不含任何不稳定键的碳六元环组合而成的二维晶体，化学稳定性高，其表面呈惰性状态，与其他介质 (如溶剂等) 的相互作用较弱，并且石墨烯片与片之间有较强的范德华力，容易产生聚集，使其难溶于水及常用的有机溶剂，这给石墨烯的进一步研究和应用造成了极大的困难。

为了充分发挥其优良性质，并改善其成型加工性 (如提高溶解性、在基体中的分散性等)，必须对石墨烯进行有效的功能化。通过引入特定的官能团，还可以赋予石墨烯新的性质，进一步拓展其应用领域。石墨烯片层的边缘和缺陷部分具有较高的活性，可以通过化学氧化的方法以石墨为原料制备石墨氧化物，由于石墨片层中插入了大量的羧基、羟基和环氧键等活性含氧官能团，接下来在溶液中可以用多种化学反应对石墨烯进行共价键功能化，共价键功能化是实现石墨烯分散、溶解、具有高反应活性、容易复合加工的重要手段。对石墨烯进行功能化，不仅可以提高其溶解性，而且可以赋予石墨烯新的性质，使其在聚合物复合材料、光电功能材料与器件以及生物医药等领域有很好的应用前景。

以石墨为原料，用氧化还原法制备的功能化石墨烯可应用在太阳能光伏电池、非线性光学材料、电化学传感器、超级电容器、锂离子电池、燃料电池、高效催化剂、石墨烯增强聚合物材料、电磁屏蔽等领域。

2. 高岭土纳米化开发利用现状

无机纳米材料在纳米材料中占据相当大的比重，而非金属矿物（高岭石、蒙

脱石等）由于具有资源丰富、成本低廉、制备工艺简单、易于生产等优势，有望成为纳米科技中应用最广泛的原料。

高岭石是一种含水的铝硅酸盐，其化学组成为 $Al_4[Si_4O_{10}]\cdot(OH)_8$，三斜晶系的层状结构硅酸盐矿物。一个晶层单元是由硅氧四面体和铝氧八面体通过共用氧互相连接形成的，单晶层厚度为 0.716nm，层间距为 0.292nm。

可以看出，高岭石的层间距很小，因此层外分子一般不易进入晶体层间。因此若想使高岭石进行纳米化，就要先使层间距扩大，再插层需要复合的物质。所采用的纳米技术手段为：先以极强性分子如乙酸铵、酰胺类物质进入高岭石层，与之发生插层反应，使层间距扩大，再进行有机高分子聚合物取代插层反应，即可成功获得高岭石 / 聚合物纳米复合材料。如先以二甲基亚砜或 N －甲基酰胺插层高岭土，然后再将此前驱体在聚乙二醇溶液中进行取代插层反应，便可得到聚乙二醇 / 高岭石纳米复合材料；其比表面积可由原高岭土的 18.6m^2/g 增至 116m^2/g，其超细样品经电子显微镜分析表明，高岭土已被剥离为纳米级片层。以高岭土为载体材料，钛酸四丁酯为前驱体，对高岭土进行插层、剥片后，用溶胶－凝胶法可以将纳米 TiO_2 复合到高岭土层间，使得材料具有光催化功能。郑州大学的姜三营成功制备了高岭土 / 纳米 TiO_2 复合光催化材料，该复合材料的微观扫描图像见图 2-4-2。

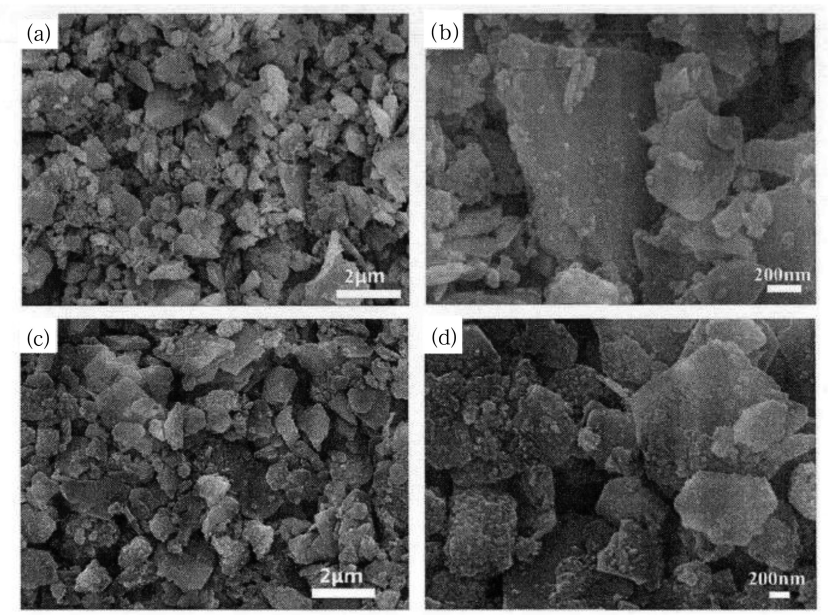
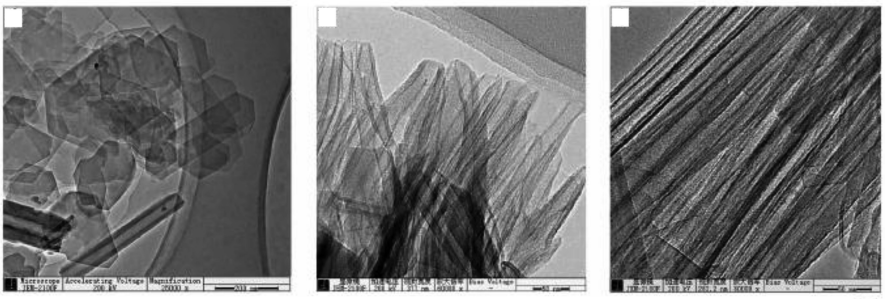


图 2-4-2　不同倍率下高岭土 / 纳米 TiO_2 复合粉体的扫描电镜图片

天津大学化工学院的马智等人以高岭土为主要原料，利用插层法制备了高岭土纳米管，见图2-4-3。这种材料具有脱硫性能，脱除噻吩的容硫量高达10.08mg/g，其比表面积以及材料内部微孔径的大小是影响脱硫率的关键。



a）　　b）　　c）

图 2-4-3　高岭土及高岭土纳米管的透射电镜图片

a）高岭土　　b) 高岭土纳米管　　c）高岭土纳米管

福州大学化学化工学院的龙海等人以高岭石为原材料，利用二甲亚砜、甲醇、十六烷基三甲基氯化铵（CTAC）插层处理，成功制备了高岭石纳米卷，见图2-4-4。值得注意的是，高岭石片层卷曲和剥离是同时进行的。地大纳米材料制造有限公司以高岭土为原料，同样采用化学插层法制备高岭土纳米粒子，细度在1μm的占90%以上，白度为87%。由于该产品具有粒度细、白度高、分散性好、比表面积大、吸附能力强和化学性质稳定等许多特点，现已广泛应用于特种造纸涂料、油漆与涂料的增稠剂、催化剂载体等。

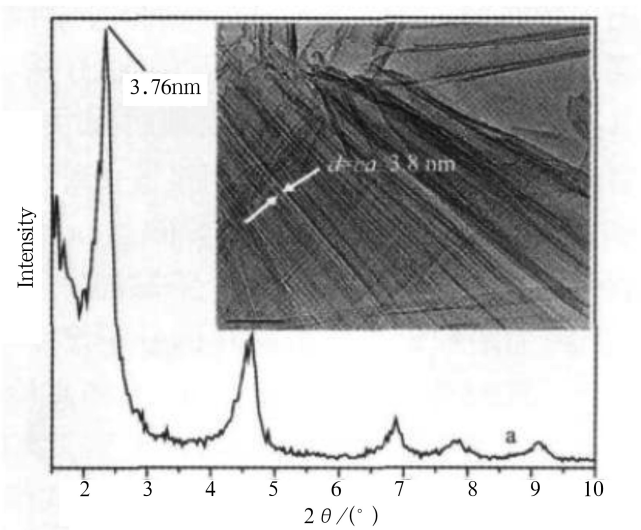
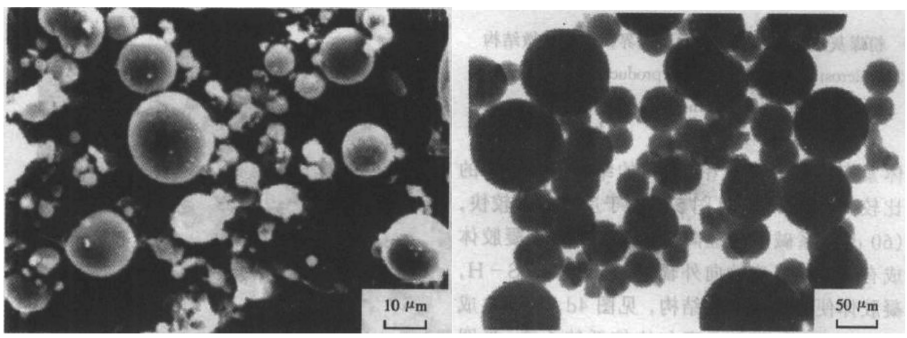


图 2-4-4　高岭石纳米卷的透射电镜照片

4.1.2 工业废弃物资源开发利用现状

工业固体废物，是指在工业生产活动中产生的固体废物，包括各种废渣、粉尘及其他废物。可分为一般工业废物，例如高炉渣、钢渣、赤泥、有色金属渣、粉煤灰、煤渣、硫酸渣、废石膏、脱硫灰、电石渣、盐泥等，还有有害固体废物。

目前已探明可用于水泥基复合材料的固体废弃物多以硅质、硅铝质为主，例如：超细硅灰、磨细矿渣、超细粉煤灰、超细稻壳灰、超细秸秆灰、煤矸石、钢渣、稀土渣、赤泥、超细偏高岭土、超细脱硫石膏、矿山尾渣等。由于这些材料中含有潜在活性纳米粒子（见图 2-4-5），因此，它不仅具有与纳米材料相同的小尺寸效应和表面效应，而且在水泥基材料中还具有特殊的“微颗粒效应”和“火山灰质效应”。前者主要表现为微填充效应、级配调节效应和调节水化产物分布的“晶核效应”，后者主要表现为消耗水泥水化产物氢氧化钙并生成 C-S-H 凝胶，提高基体密实性和微观组分之间的粘结性能。



a) b)

图 2-4-5 固体废弃物微粉微观图片

a）粉煤灰 b）硅灰

硅灰是铁合金在冶炼硅铁和工业硅（金属硅）时，矿热电炉内产生的大量挥发性很强的 SiO_2 和 Si 气体，与空气迅速氧化冷凝沉淀而成。硅灰在形成过程中，因相变的过程中受表面张力的作用，形成了非结晶相无定形圆球状颗粒，其比表面积很大、活性很高。掺有硅灰的物料，微小的球状体可以起到润滑的作用。工业固体废弃物硅灰经过粉磨获得超细硅灰，外观为白色粉末，超细硅灰中 50% 以上粒子粒径小于 0.1 μm，比表面积为 20 ～ 28m^2/g，微观为实心球体。

硅灰主要成分为无定形二氧化硅，活性较高，可作为微集料填充在水泥中，降低水泥中的孔径，同时由于其具有火山灰效应，还可以与水泥浆体中的氢氧化钙反应生成水化硅酸钙凝胶，使水泥浆体具有密实性。除此之外，由于纳米尺寸的表面效应，加入硅灰会吸收水分，而在水泥浆体养护后期缓慢释放出来，使水

泥后期强度同样增加，具有内养护作用。添加硅灰的混凝土还有良好的抗冲击、抗腐蚀、抗渗、抗折等优异性能，这些都归因于硅灰中超细二氧化硅纳米粒子。超细硅灰不仅可以增强混凝土，还可以加入塑料中，增加塑料的硬度，还可以作为有机化合物的补强材料，在橡胶、树脂、涂料、油漆等材料中发挥增强作用。

4.1.3 农业废弃物资源开发利用现状

稻壳和秸秆是农作物加工的主要副产物。我国是世界上的水稻生产大国，每年产量超过 2 亿 t，由此可生产出来的稻壳就有 0.4 亿 t。稻壳和秸秆除了可以作为初级燃料进行燃烧取暖供能外，稻壳中丰富的碳分和灰分也可以经过处理得到应用。稻壳主要含有无机质非晶态二氧化硅及有机质纤维，粗纤维、木质素及灰含量分别为 40.8%、34% 和 21%，粗蛋白和粗脂肪的含量较低，分别占 4.5% 和 1.5%。稻壳灰（RHA）是稻壳经高温煅烧后的剩余物，属于稻壳中的无机组分，其中 SiO_2 占 93.1%，其余还有少量的 K_2O、Na_2O、MgO、Al_2O_3 等。值得注意的是，稻壳中的灰分 SiO_2 是以无定形态存在的，具有较高的活性和超细尺寸和超大比表面积，从而使 RHA 纳米化成为可能。

RHA 中潜在的 SiO_2 纳米粒子使其广泛应用在混凝土领域和制备白炭黑。

国内学者欧阳东在透射电镜（TEM）下观察发现，RHA 粉末主要由尺寸在 1 μm 以上的块状颗粒组成，块状颗粒由大量纳米（0.1 ～ 100nm）SiO_2 凝胶粒子非紧密疏松形成，纳米 SiO_2 凝胶粒子由许多更细小的微晶组成，如图 2-4-6、图 2-4-7 所示，并且在最优控制条件下焚烧得到的优质低温 RHA 中的 SiO_2 聚合度小于硅灰的聚合度，对活性更有利。纳米尺度的 SiO_2 凝胶粒子和大量纳米尺度的孔隙是 RHA 具有巨大比表面积和超高火山灰活性的根本原因。

图 2-4-6　RHA 块状颗粒

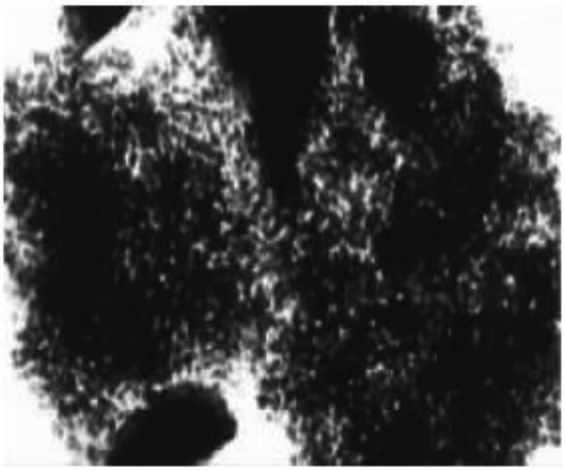


图 2-4-7　RHA 中 SiO_2 粒子

欧阳东根据电镜观察结果，总结出 RHA 的三层次显微结构模型：①结构尺度为 1 ～ 1 000 μm；②结构尺度为 0.05 ～ 1 μm 的纳米 SiO_2 块状粒子；③结构尺度为 50nm 的 SiO_2 米粒状颗粒。同时指出三个不同层次的显微结构模型显示了 RHA 中主要存在的两种孔隙：微米尺度（1 ～ 10 μm）蜂窝状透过纤维网络孔，由稻壳纤维板片交错形成，与稻壳组织结构有关，与焚烧过程无关；纳米尺度（＜ 50nm）的 SiO_2 凝胶粒子非紧密聚集而成的孔隙，与焚烧制备过程有关，对 RHA 的比表面积和化学活性有重要影响。

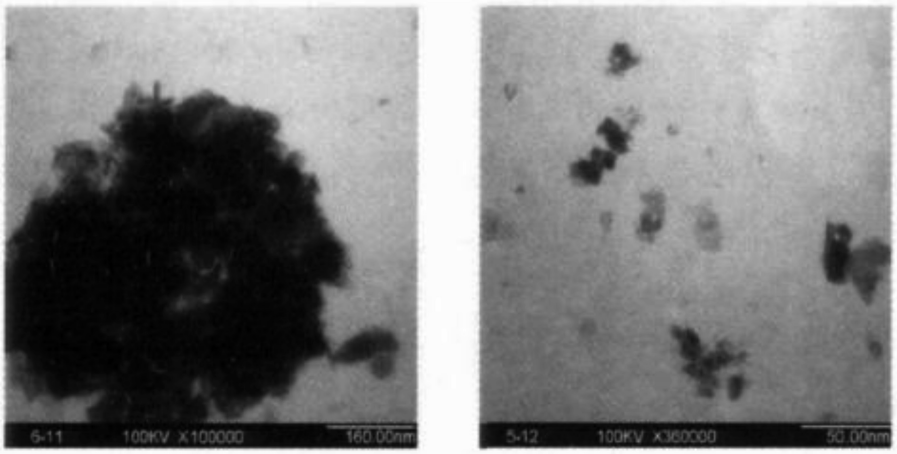
庄一舟等人将 RHA 与硅灰同时掺入混凝土中，发现 RHA 与硅灰混合掺入能明显提高抗压强度，效果优于单掺 RHA 和硅灰。分析原因是：硅灰是尺寸比较小的圆球形颗粒，填充效果优于 RHA，而 RHA 的比表面积比较大，火山灰活性较高，因此两者联合作用效果更优。同时，RHA 的掺入还可以增加孔径较小的微孔数量，减小孔径较大的有害孔，优化孔结构，有利于提高混凝土强度。余其俊等人也研究了 RHA 对混凝土的有益作用，指出其不仅能使混凝土强度和韧性提高，同时还能使混凝土具有抗腐蚀、抗渗、抗碳化性能。这是由于活性 RHA 中的 SiO_2 纳米粒子和纳米孔隙使其具有超高活性，与水化产物氢氧化钙反应生成的具有微孔的凝胶对氯离子和碳具有固化作用，同时由于降低了有害孔，增加了有益孔，水和空气在混凝土中的扩散系数降低，赋予了混凝土良好的抗渗性。

RHA 中的潜在 SiO_2 纳米粒子除了可以增强混凝土外，还可以通过提纯使二氧化硅含量超过 98%，制备高纯白炭黑。白炭黑又称水合二氧化硅，即沉淀二氧

化硅纳米粒子，具有多孔性、高分散性，化学稳定性好，耐高温、绝缘性好，是一种重要的化工原料，可替代炭黑应用在橡胶行业。

目前国内外利用 RHA 制备生产白炭黑的传统工艺主要是化学法，可分为湿法和干法两类。干法是 RHA 通过研磨、酸洗等前处理后直接进行煅烧，将稻壳里面的有机物充分裂解成挥发分和残留碳，随着温度的继续升高，残留的碳会与空气中的二氧化碳反应生成一氧化碳而挥发。但是该工艺对煅烧设备要求较高，燃烧速率、通风条件、煅烧温度等都影响白炭黑的质量，因此干法工艺制取白炭黑面临着很多挑战。而湿法制取白炭黑可简单描述为沉淀法，包括二氧化碳沉淀法和酸沉淀法，其中酸沉淀法由于工艺简单、反应可控等优点已得到推广。

国内学者甘露用稻壳联产纳米白炭黑与活性炭，使稻壳中的硅质和炭质都得到利用。首先对稻壳进行炭化，酸处理去除金属杂质后与碱进行溶煮，使 RHA 中的二氧化硅溶出，过滤分离滤液和滤渣。滤渣是制备活性炭的原料，滤液经过氯化铵采用化学沉淀法制备纳米白炭黑，粒径小于 50nm，在乙醇中陈化并且加表面活性剂后，沉淀的团聚消失，见图 2-4-8。滤渣经过 KOH 活化，得到具有优良吸附性能的活性炭。方放团队通过对碳化稻壳进行溶煮，用碳酸钾做提取液，将碳化稻壳中的硅和碳分离，滤渣经过活化和后处理等工艺得到吸附性能良好的活性炭，通过实验得出：稻壳活性炭活化工艺条件是活化温度 850℃，活化物质是 KOH，活化时间至少 2h，滤液制取白炭黑的最佳工艺是陈化温度 3℃，陈化时间不少于 3h，可获得 SiO_2 白度达 89.91%，SiO_2 提取率为 25.77%。



a)　　b)

图 2-4-8　沉淀法制备白炭黑的透射电镜图谱

a）未添加表面活性剂及未用乙醇陈化　b）添加表面活性剂及用乙醇陈化

4.2 资源开发潜力

矿产资源是人类生产和生活资料的重要源泉，是国民经济和社会发展的重要基础。我国目前有 90% 以上的能源和 80% 左右的工业原料都取自矿产资源。

我国高岭土矿产资源的总储量已跃居世界之首位，尤其是我国特有的优势煤系高岭土矿产资源，其储量与质量均堪称世界之最。随着纳米科技的高速、迅猛发展，非金属矿物纳米材料系列产品，尤其是利用高岭土生产制备的矿物纳米材料系列产品及其在相关领域中的应用开发研究亦发展迅速。利用高岭土生产制备矿物纳米材料是近年来相继开发的高新技术、新产品，尽管问世不久，但已经逐步显示出强大的生命力和广阔的应用发展前景。

科学研究成果表明，高岭土矿物纳米材料系列产品，具有原料极其易得，加工工艺相对简单、生产成本低廉、产品质量稳定、易于产业化和规模化开发等诸多优点。同时，由于其产品细度已在纳米级尺度范围之内，故其所具备的良好的小尺寸效应、比表面效应、紫外线与红外线的吸收性能均与市场上高价位的纳米无机非金属氧化物的主要综合性能指标相近或相当。随着纳米科技产品的日趋实用化与规模化开发，高岭土矿物纳米材料必将成为今后纳米科技应用领域中质优、价廉的重要基础性原料。

高岭土矿物纳米材料可广泛应用于纳米改性橡胶的增强剂与耐老化剂，改性塑料的增强、增韧及耐老化剂，塑料薄膜的红外线吸收与紫外线阻隔剂，涂料的增强等诸多应用领域，其开发应用前景广阔而诱人。

石墨是碳的结晶矿物之一，具有自润滑、导电和耐高温等多种独特的物理化学性质。鳞片石墨兼有非金属和金属双重特性。采用高技术处理石墨，不但可以扩张石墨固有的性质，还可以赋予石墨新的优异性能。石墨作为石墨烯纳米片层的前驱体，可以通过将石墨氧化、还原或机械剥离的方法制备石墨烯纳米片层，应用领域广泛。

世界上已发现的大中型石墨矿床主要分布在中国、印度、巴西、捷克、加拿大和墨西哥等国家和地区。根据美国地质勘探局资料，世界石墨储量为 7 100 万 t，我国石墨储量为 5 500 万 t，占世界的 77%。我国的石墨矿产有晶质石墨和隐晶质石墨两种类型。近 20 年，我国晶质石墨储量呈增加态势，体现了我国良好的石墨开发潜力。

工业废渣是指在工业生产和工业加工过程中，以及燃料燃烧、矿物开采、交通运输、环境治理过程中所丢弃的固体、半固体物质的总称。据中国环境公报统

计，在各类工业废渣中，排前四位的分别是尾矿、粉煤灰、炉渣、冶炼废渣，占总量近 90%，这些都含有潜在的纳米粒子，可以用于制备超高性能混凝土。

煤粉在电厂锅炉燃烧过程中，碳和挥发物被烧掉后剩下的矿物质，如黏土、页岩、石英等经烧至熔融，悬浮在炉烟气中，熔融的矿物质随炉烟气迅速移至低温区固化，因表面张力形成球形颗粒，在排放到大气以前被收集，即为粉煤灰。我国是世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一，煤在能源构成中约占 78%，全国燃煤消耗量达到 12 亿 t，发电及热电联产消耗原煤 6 亿 t，排放的粉煤灰渣高达 1.8 亿 t，我国已成为世界上最大的用煤国和排灰国，粉煤灰堆存量已高达 12.5 亿 t。粉煤灰与其他火山灰质材料相比，结构比较致密、内比表面积小，有很多球状颗粒，所以需水量较低、干缩性小、抗裂性好，水化热低也是它的显著优点，抗蚀性好，因此利用粉煤灰作水泥的混合材料，既可减少水泥熟料用量，降低成本，改善水泥的某些性能，又使废弃物资源得以利用，使得废物资源纳米化在水泥应用中表现出极大的潜力。

同样，作为农业废弃物的稻壳和秸秆是产量更大的废弃物资源，产生的稻壳秸秆等废弃物占稻谷产量的 20%。这些废弃物不仅可以作为初级燃料燃烧，还可以通过干化学法、湿化学法将其中潜在的纳米粒子提纯，应用于增强混凝土、橡胶、塑料等领域，具有极为宽广的开发利用潜力。

4.3 资源可持续性

按联合国世界环境与发展委员会的概括，“可持续发展”是指一种既能满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展。它自提出后，从生态环境领域迅速扩展到整个经济领域和社会领域，成为左右发展决策的强有力理论体系。

我国拥有丰富的资源，是世界第一稀土资源大国，稀土资源是我国的优势矿产之一，稀土氧化物年产量占全球总产量的 95% 以上。稀土资源在全国分布广泛，到目前为止，我国已在 22 个省市区发现上千处稀土矿床、矿点和矿化产地，品种齐全、储量大。我国稀土产量主要来自白云鄂博矿、四川冕宁稀土矿、南方离子型稀土矿。其中，白云鄂博矿是稀土与铁、铌、钍等元素共生的矿床，矿区内有 5 个矿体，拥有的稀土资源量巨大。目前开发利用的稀土资源主要来自主、东矿体，稀土是作为铁矿的伴生矿种利用，主产品铁精矿可以分担其采矿、选矿成本，因而可以提供生产成本较低的稀土矿产品。

我国已发现的稀土资源丰富，但优质稀土资源是有限的。目前拥有稀土资源约占全球稀土资源的 23% 左右。近年我国稀土产量占全世界产量的 90% 以上，与资源占有量不匹配，长此下去，将加快我国优质稀土资源的消耗，不利于可持续发展。更多的国家和地区开发稀土矿山，有利于我们共同面对稀土矿山开发过程的一些问题。

镍在地球上是储量丰富的一种金属。世界陆地查明含镍品位在 1% 左右的资源量为 1.3 亿 t，其中 60% 属于红土型镍矿床 (氧化镍矿床，含氧化铁)，共生、伴生矿产主要是铁和钴。全球镍资源中红土型约占 55%，硫化物型为 28% ，海底铁锰结核中的镍占 17%。海底铁锰结核由于开采技术及对海洋污染等因素，目前尚未实际开发；红土型矿床因为高压酸浸技术 (PAL) 的日趋进步，在澳大利亚正被开采利用，但生产成本相对较高，还不是目前最主要的开发类型；硫化镍资源以其高品位、易处理和分布集中等特点，是当今利用最广泛的镍资源类型。

据美国地质调查局（USGS）资料显示，全球至今探明镍基础储量约 6 900 万 t，资源量 14 800 万 t。基础储量总量的 72.2% 为红土镍矿，平均品位为 1.28%；剩余 27.8% 为硫化镍矿，平均品位为 0.58%。硫化镍矿与红土镍矿的矿产镍量比为 58∶42。主要分布于澳大利亚、古巴、新喀里多尼亚、加拿大、南非、印度尼西亚和俄罗斯等国家。

2014 年我国镍矿查明资源储量 1 016.9 万 t，增长 12.9%；资源查明率 34.6%。2014 年新增查明资源储量超 100 万 t 的镍矿区为青海格尔木市夏日哈木 HS26 号异常区铜镍矿。

4.4 资源开发预测

矿产资源是社会经济持续发展的物质基础，矿产资源的可持续利用是社会经济可持续发展的重要组成和前提条件。中国目前 90% 以上的能源和 80% 左右的工业原料都取自矿产资源，矿产资源支撑了在中国 GDP 中占 70% 的国民经济生产部门的运转。矿产资源开发就是为满足社会经济发展需要，而对矿产资源进行勘探、开采和冶炼加工等生产活动过程。

矿产资源是不可再生资源，是国家的宝贵财富，但是我国人均占有量仅为世界人均水平的 58%，且矿产资源保有储量严重不足。当前我国矿产资源特别是能源资源供需矛盾突出，资源瓶颈已成为我国经济社会发展中长期存在的问题和深层次矛盾。据预测，45 种主要矿产资源中，能保证 2020 年需要的仅有 24 种。

我国粗放经济增长方式所造成的资源大量消耗和浪费现象很严重，将使我国矿产资源供需紧张雪上加霜。

10 年后，中国将成为世界重要固体矿产资源消费第一大国。世界 150 年，美、日、中 50 年以及包括德、韩和中国 6 个国家或地区 20 年来的经济发展与有色金属矿产资源消费关系的经验模式表明，经济增长与矿产资源消费同步增长的趋势一直没有变，即使是处于工业化发展阶段的美国也是如此。这就意味着未来世界经济的发展与快速增长仍需要以大量消费矿产资源储量保证，我国矿产资源保有年限锐减，国内供应能力日降，国民经济发展的物质支撑严重不足，所以要对我国未来一段时间内矿产资源需求量进行预测，以更好地平衡国内主要矿产中供应与需求的关系。

经预测，2020 年我国能源消费将达到 32 亿 t（标准煤），相比 2005 年能源消费量增加了 1.97 倍，石油消费量增加了 1.81 倍，钢消费量增加了 8.03 倍，铜消费量增加了 13.75 倍，铝消费量增加了 5.79 倍。但是到 2020 年，我国石油可供 1.71 亿 t，铜可供 137 万 t，铝可供 405 万 t，根据预测结果，到 2020 年，如果我国不采取保障矿产资源安全的相关措施，石油的缺口将达 3.04 亿 t，铜的缺口将达到 6 284 万 t，铝的缺口将达 3 183 万 t。由此可以看出，我国主要矿产品安全形势不容乐观。矿产作为经济、社会赖以发展的生产要素和原料来源，具有举足轻重的基础地位。到 2020 年我国要基本实现工业化、建设现代农业，对石油能源和其他门类矿产资源的需求将出现较大幅度的增长，如不采取切实可行的措施，矿产资源安全势必会成为制约我国经济快速发展的阻力。

第 5 章　我国纳米功能材料领域发展的风险分析

5.1　纳米功能材料科技与产业发展方向的选择

随着经济社会的发展，纳米材料与科技也迅速蓬勃发展，纳米功能材料的研究随即成为热点。专家预测，纳米科技的发展将对 21 世纪的社会经济发展、生产方法和人们的生活带来巨大的影响。因而，纳米功能材料和纳米技术作为极具市场潜力和发展前景的新材料和新兴技术，已经得到世界各国的普遍关注。基于最近几年实验室理论的研究基础，我国部分纳米功能材料已经得以在日常生活

中应用，例如纳米化妆品、纳米清洁用品、纳米抗菌面料、纳米涂料等等。纳米功能材料在能源环境、生物医学、信息产业、航空航天、机电等方面有了广泛并且实际的应用，在这些相关产业中的发展也越来越迅速。

5.1.1 技术成熟度

技术成熟度即某种技术的成熟程度或者完善程度，它是项目风险管理的重要方面，是衡量技术对项目目标吻合程度的一种度量方法。下面简单介绍利用三种技术成熟度评定方法评定纳米技术的成熟度。

第一种是技术成熟度等级（TRL）。这是指对技术成熟程度进行度量和评测的一种标准，由美国航空航天局于 1989 年提出，现今已有九个等级，可用于评价特定技术的成熟程度，也可用于判断不同技术对目标的满足程度。整个产业化过程又可分为概念研究、技术开发、工程研制、生产部署四个阶段。利用技术成熟度等级的方法对纳米技术评价，按照 TRL5 定义 —— 完成了模拟环境下的实验样件的验证可知，我国纳米技术以及纳米功能材料的制备技术基本处于 TRL5 阶段。从市场成熟度出发，我国纳米技术仍处于技术开发研究阶段，纳米技术产品成熟度较低，纳米技术产品市场整体供不应求，纳米技术产业化缺乏推动和牵引力。

第二种为基于文献计量学的产品技术成熟度分析方法，Roper 等人认为可以用期刊论文数与会议论文数之比来分析产品技术成熟度。当会议论文数量少于期刊论文数量的时候，表明技术已经逐渐成熟；当会议论文数量多于期刊论文数量的时候，则表示此技术还未成熟仍处于人们的争论之中。以纳米功能材料为关键词，在万方数据库搜索，截至 2014 年 11 月 1 日，数据库中的期刊论文有 5 273 篇，会议论文仅 2 254 篇，会议论文量明显少于期刊论文。根据 Roper 的观点，这表明纳米技术以及纳米功能材料的制备技术已经逐渐成熟。同样以纳米功能材料为关键词，以 2014 年 11 月 1 日为截止日期，在中国知网数据库搜索近十年来的结果显示如图 2-5-1。其中，2010—2013 年论文量增长趋势最明显，其论文数量分别为 1 020 篇、1 240 篇、1 709 篇、2 093 篇。因此可知纳米功能材料的研究还处于成熟度的上升期，尤其是近四年来上升比较显著。

最后一种是基于专利的产品技术成熟度分析方法。产品技术成熟度的评估目的是要研究产品技术的进化过程，产品进化的推动力是技术创新，故而技术创新在产品进化中扮演着重要的角色。技术创新的成果之一是专利，专利文献可以反映某个技术领域中的现状，因此利用专利来分析技术成熟度。张换高等人在 Altshuller 和 Mann 研究之上，提出使用专利数量、专利等级以及弥补缺陷的专利数

量三个指数来评估技术的成熟度。专利等级与专利被引用次数有关，纳米功能材料方面的弥补缺陷类专利还是极少数，因此通过专利评价纳米技术的成熟度主要通过专利数量来衡量。在中国知网数据库中检索有关纳米功能材料的专利结果如图 2-5-2 所示。近十年来有关纳米功能材料的专利量基本上呈现增长的趋势，其中 2010—2013 年专利数分别为 126 件、144 件、251 件、263 件，2011—2012 年增长的趋势最大。因此，由专利数量变化推断纳米技术与材料逐渐成熟。

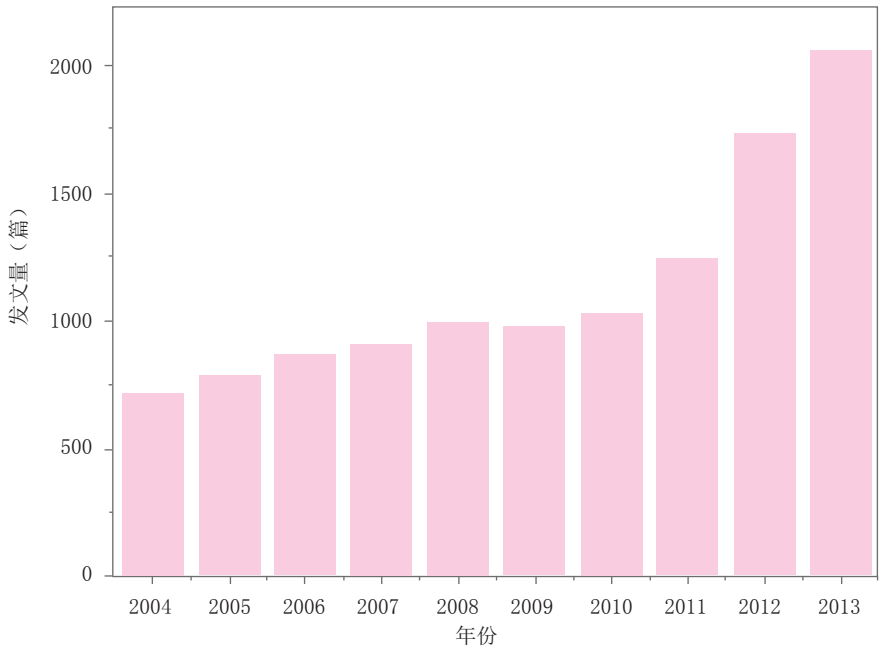


图 2-5-1　2004—2013 年有关纳米功能材料的论文量变化趋势

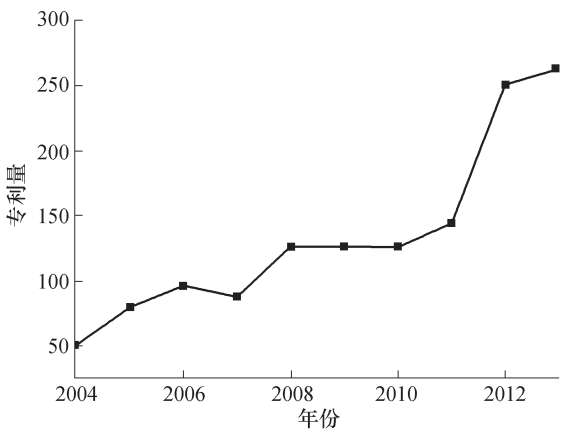


图 2-5-2　2004—2013 年有关纳米功能材料的专利量变化趋势图

纳米技术产业发展的主要驱动力是市场需求，我国纳米技术产品市场并不是很成熟，市场需求动力限制了纳米技术产业化的实施。除此之外，消费者并不是很了解纳米技术产品，导致纳米技术产品的认同率下降。因而，如今纳米技术产业的发展仍缺乏市场需求的驱动，若想提高产业化效率还需要普及纳米技术的优势。

5.1.2 资源可获得性

在对纳米功能材料进行研究的时候，需要考虑其资源的重要性，研究过程中主要考虑人力资源与物质资源。其中人力资源是指研究员的来源，物质资源是指生产资料的来源。

1. 人力资源

纳米功能材料方面的研究专家主要通过海外引进，以此来弥补国内人力资源的不足。对海外人才的引进主要考虑学历学位，引进的人才必须在海外取得博士，并且在海外对纳米功能材料研究取得了显著的成果。

我国引进海外高层次人才从 20 世纪 70 年代开始，21 世纪初引进人才逐渐增加。从 2008 年至今，国内以推动经济发展为目标，引进海外高层次人才，其中纳米材料方面的人才占一大部分。2008 年国家制定了“千人计划”政策，重点引进长期项目非华裔专家。纳米功能材料的人才引进之后可在纳米公司、全国各大高校、科研院所等担任专业技术职务，同时担任“863”“973”、国家自然科学基金等项目的主持人，推动我国纳米功能材料的发展。

2. 物质资源

21 世纪材料学的研究越来越多，这可能是因为材料已经被认为是提高人类生活水平的物质基础。当下研究最多的便是纳米材料，在研究的同时需要注意纳米材料的功能特性与生态的协调性，并且需要满足当下社会的可持续发展这一要求。

我们可以通过不同的物理和化学方法来制备纳米材料，制备材料的来源也很广泛，其中分为：可再生资源，如风能、太阳能等；可更新资源，如生物资源；不可再生资源，如矿产资源等。考虑到可持续发展的硬性要求，需要合理利用不可再生资源，提高可再生资源的利用率，并且开发潜在资源。纳米技术可以应用于太阳电池制备，但是能量转化效率还有待提高。目前生态纳米功能材料的研究成为热点，它考虑了生态的协调性，例如将工业农业废弃物变废为宝，制备成对人类有用的纳米功能材料，然后与其他基础材料复合以提高材料的物理化学性能。

5.1.3 发展潜力

曾有专家称 21 世纪有三大关键的技术，分别为纳米技术、信息技术以及生物技术。虽然目前纳米技术还不够成熟，但是由于其在多方面有着潜在应用，比如军事、航空航天、医学等方面，因而市场发展潜力巨大。

新材料在线在 2014 年发布了未来最具潜力的十大新材料评选活动，综合国内外知名研究所机构、科技媒体评论、行业热点研究以及公司的研究进展初选出 20 种材料进行初选，具体为石墨烯、气凝胶、碳纳米管、富勒烯、非晶合金、泡沫金属、离子液体、纳米纤维素、纳米点钙钛矿、3D 打印材料、柔性玻璃、自组装玻璃、可降解生物材料、炭钛复合材料、超材料、超导材料、形状记忆合金、磁致伸缩材料、磁（电）流体材料、智能高分子凝胶 20 种材料。投票结果显示，石墨烯居于首位，碳纳米管及纳米纤维素也位于前十，这表明纳米材料将在未来引领世界。

苏州工业园区是国内首个把纳米技术产业作为引领转型升级的战略性新兴产业的区域。苏州纳米城于 2013 年年初开始使用，涵盖了纳米技术的各个领域，为纳米技术产业的研发、生产等提供完整的产业聚合区。截至 2013 年 5 月已有 27 个高端项目被签约。除此之外，在天津建立了国家纳米技术与工程研究院，在北京建立了国家纳米科学中心，在上海建立了纳米技术及应用国家工程研究中心，这些研究所以及产业园将有力地推动我国纳米科学技术的发展，加速纳米科学技术产业化进程。对纳米产品的大量投资均表明纳米技术存在着巨大的潜在发展实力。

5.2 纳米功能材料发展的风险

若要纳米功能材料得以全面的应用，我们需要加大力度研究其潜在的各种风险，之后制定并实施相应的制度，使纳米技术更加安全的发展。本书将从以下四个方向讨论纳米功能材料的发展风险。

5.2.1 政策稳定性风险

《纳米研究国家重大科学研究计划“十二五”专项规划》明确表明，对纳米材料的研究需加强顶层设计，实施好专项研究计划；加强基地建设，促进项目、基地、人才结合；加大创新人才培养和引进力度；加强国际合作与科学普及。

纳米功能材料发展的研究，以石墨烯为例，世界各国政府均进行了巨额投资。德国在 2009 年由科学基金会开始开展石墨烯的前沿研究。英国在 2011 年发布的

《促进增长的创新与发展攻略》中明确表明投入 5 000 万英镑支持石墨烯的基础研究以及产业化，且 2013 年在曼彻斯特大学投资 6 100 万英镑创建国家石墨烯研究所，该研究所 2015 年 3 月初正式开放。2015 年 10 月，国家主度习近平访英期间专程参观了该研究所。韩国原知识经济部计划在 2012—2018 年为石墨烯的研究提供 2.5 亿美元资助，其中 1.24 亿美元用来研发技术，其余的用来研究产业化。中国国家自然科学基金委员会对石墨烯的研究给予了高度的重视，近年来支持与石墨烯相关的课题数百个，相关项目上千个。2014 年科技部将石墨烯列为“863”计划纳米材料专项支持内容。然而石墨烯产业化仍处于发展初期，整个产业链还不具有完整性。在整个石墨烯生产过程中，存在限制石墨烯商业化发展的几大瓶颈，其中包括石墨烯的制备方法、转移技术、发展潜在应用等诸多问题。若想真正实现石墨烯的产业化，这些方面的研究必须取得突破。在此前“863”项目扶持的基础上，相关部门正在考虑对石墨烯材料和应用加码扶持，其中工信部等相关部门正在考虑统筹研究石墨烯材料，而石墨烯材料也有望进入新材料“十三五”规划。

5.2.2 资源可持续性风险

《纳米研究国家重大科学研究计划“十二五”专项规划》在主要任务中明确列出环境纳米科学与技术，其中提到发展新型可降解塑料、短效农药和长效化肥等物质，这充分体现了纳米材料需要满足可持续发展的要求。

目前纳米功能材料大多数都被添加至不同的基础材料中，以达到改变其物理化学性能的目的，比如在混凝土中加入纳米 Fe_2O_3 增强混凝土的强度，但是很少考虑到建筑报废或者组件被毁坏的话，纳米材料将进入环境，从而对环境造成一定的伤害。目前我国亟需从可持续发展出发对纳米功能材料进行研究，而不能是盲目地追求纳米功能材料的应用，需要制定一份符合我国国情的纳米材料安全规划。对待纳米材料废弃物，需要遵循固体废弃物管理的原则——减量、回用、循环，减少对环境的压力，降低纳米材料给社会带来的风险。

以石墨烯为例，根据美国地质调查局数据，中国晶质石墨资源基础储量约占全世界 72%，中国石墨资源非常丰富。最大程度地将自然界中的能源应用到纳米技术领域中，可减少资源可持续风险。除了对本来就有的资源充分利用以减少对环境的破坏外，对纳米材料的研究还需要开发新的资源。

5.2.3 市场寻求风险

近年来，与纳米技术关联最紧密的纳米材料已经成为世界各国投巨资进

行应用研究的重点领域，纳米功能材料的研发投入激增。由于纳米材料具有表面效应、小尺寸效应、量子效应和宏观量子隧道效应，故其在热学、力学、光学、电学、磁学等方面同宏观固体有着显著的差异，利用这些效应，纳米材料产业化将产生与传统材料不一致的产品。然而纳米产品在市场寻求上依然存在着问题。

纳米产品市场的寻求需要符合两个基本要求：一是基于基础研究，另一个则是符合市场的需求。针对第一个要求，我们需要对纳米功能材料的基础研究进行调研，以 web of science 为数据库，nanomaterial 为检索词检索，检索结果显示有 5 078 篇关于纳米材料的文章。按被引频次排序，最高被引频次为 1 494，是一篇关于碳纳米管在生物 DNA 上应用的文章，这一数据与市场上如今纳米产品在生物上的应用是热点吻合。值得注意的是，被引频次高的文章基本上都是关于碳纳米材料的研究，比如碳纳米管、纳米纤维以及石墨烯等。在基础研究之上，纳米技术亦渐趋成熟。如今纳米技术是世界各国目前研究的重点领域之一，大型跨国公司和科研机构都投入巨资从事纳米材料的开发和产业化工作，纳米材料存在的制造工艺控制复杂、产品生产技术成本高等问题，将在未来 5 ～ 10 年内逐一得到解决。

而针对市场需求这一要求，当务之急是要普及纳米知识，消除纳米行业鱼龙混杂的现象。目前国内的纳米材料企业市场管理参差不齐，很多企业在名义上说的是从事纳米材料生产，实际上只是从事纳米材料的加工，或者是假借纳米概念包装原有产品。在市场上，纳米产品的需求较旺盛，其中纳米粉体功能材料就在塑料、陶瓷、涂料、橡胶、粘合剂、油墨以及催化剂等行业的发展中起着重要的作用。我国在世界制造业中心的地位逐渐上升，这必将导致电子、机械等行业的持续增长发展，经过改性的纳米功能材料在电子、生物医药、机械、航空航天等方面有着广泛的应用，故有优越性能的纳米产品在这些方面的需求随社会发展而增加。除此之外，市场上还缺乏高端纳米产品，这一点又与纳米功能材料的基础研究相关。基于纳米材料的价格，纳米功能材料的很多应用还未得以产业化，某些实现产业化的纳米产品目前也无法取代传统材料所制备的产品。整个纳米产业化过程中我们还需要增强生产设备以及优化生产工艺。

在纳米市场的寻求过程中，除了明确以上两点要求外还需要高度关注具有重大影响的国际性活动。在市场需求基础之上，还需要秉承降低生产成本、节约资源的原则。

5.2.4 投融资风险

商业计划是关于商业优势以及目标的文件，企业家能通过它获得风险投资，同时公司还可以用它与感兴趣的合作者交流合作。一个企业家在创建纳米技术企业之前必须写一份商业计划，商业计划可以确保外界的投资，可以对顾客解释企业的愿景。商业计划一般会包含市场机遇、风险、估价 / 投资回报、策略、管理等内容。企业家可以借助纳米公司的商业计划进行纳米功能材料的投融资。

很多纳米技术创业者还未做好接受风险投资的准备，虽然有大量的物力财力已经被用到纳米尺寸的研究与设计，但是这个领域的发展还不够完善。许多创业公司只是刚从研究者的科研突破转变而来，最近几年都无法完成产业化。即使有的纳米技术能在商品上展现出特异功能，但是仍无法大批量生产。对于纳米技术与材料，“风险投资者不能接受在五年之内不能产生投资额十倍的利润，也不能在三年内产生投资额五倍的利润的投资。”

尽管纳米材料的研究基本仍处于起步阶段，但是一些风险投资者已经对纳米产生了浓厚的兴趣。一位名为 Steve Jurvetson 的投资家曾宣称“纳米技术是下一代技术的浪潮，是科学革命的核心，将彻底改革大多数产业并间接影响社会结构”。2003 年，风险投资家将 3 800 万美元投入到 Nanosys 公司。

纳米公司进行投资的时候必须考虑到技术发展速度以及竞争对象等因素。风险投资家在投资之前会对纳米公司进行估价，由于纳米技术还不够成熟，纳米材料与技术能否被应用到各个领域还是个未知数，所以投资家在投资的时候主要看公司的智力资产—研究者影响力、论文专利质量等。要对这些无形的资产进行评判很困难，故而对纳米的投资存在着较大的风险。除此之外投资家在对某个公司投资前会考略到市场竞争问题，纳米公司若想得到大额的投资必须提高自身在市场的竞争力。

第 6 章　纳米功能材料行业准入基本条件

行业一般是指其按生产同类产品或具有相同工艺过程或提供同类劳动服务划分的经济活动类别，如饮食行业、服装行业、机械行业、金融行业、移动互联网行业等。

纳米功能材料行业是建立在纳米材料技术基础之上，开发生产纳米材料产品，并形成的具有同一属性的企业的集合，包括纳米材料及其相关产品和技术装备，

是高新技术行业的重要组成部分。主要包括以下三层含义：一是纳米材料行业是基于纳米材料技术建立的，其行业特征是纳米材料技术在行业形成中起决定性作用；二是纳米材料技术被应用于产品和生产过程，形成具有高科技含量的市场产品；三是使用纳米材料技术或相近技术的企业构成了一个群体，在市场上形成一定的规模，足以构成一个新的行业。

纳米材料的发展，首先应切入传统行业，调整行业结构，注入科技含量，为实现传统行业的升级改造、为 GDP 的增长作出贡献；同时，也应该寻找机遇，向新兴的高科技行业渗透，应特别重视纳米材料在环境、能源、医药和国防等领域的应用。培育新纳米材料行业，逐步形成行业链，使这些行业的起点定位在 21 世纪技术制高点上，为实现中国行业跨越式发展奠定基础。

据不完全统计（表 2-6-1），2014 年下半年之前，仅有 8 家上市公司公布了涉足纳米领域的相关信息，占现已公告“触纳”的上市公司总数的 12.40%；2014 年下半年，半年内公告投资纳米的上市公司骤增了 25 家，占现已公告“触纳”的上市公司总数的 43.66%；2015 年上半年，更是又有 30 家上市公司宣布加盟纳米领域，占现所有公告“触纳”的上市公司的 47.84%。从已投资纳米上市公司的投资力度分布来看，已投资 1 000 万元以下的占 54.54%，已投资 5 000 万元以上的（包括只涉及纳米概念的相关投资）不足 13.64%。由此可见，小小纳米的无穷魅力，正吸引着越来越多的上市公司积极地投身于这场“时代的决战”之中。

表 2-6-1　上市公司投资纳米领域的力度比照

资 金 额	拟投资的上市公司（家）	占比 (%)	已投资的上市公司（家）	占比 (%)
500 万元以下	5	13.89	5	22.72
500 万～1 000 万元	8	22.22	7	31.82
1 000 万～2 000 万元	4	11.12	3	13.63
2 000 万～5 000 万元	8	22.22	4	18.19
5 000 万元～1 亿元	3	8.33	1	4.54
1 亿元以上	8	22.22	2	9.10
总　计	36	100.00	22	100.00

为落实国家新兴产业发展战略，越来越多的地方和政府开始把新兴产业作为第一方略，立足区域实际，坚持错位竞争，强化发展特色，确定了纳米光电子、生物医药、融合通信、生态环保、创意行业等新兴行业。纳米技术行业逐渐成

为发展新兴产业的重大突破口和引领区域转型发展的核心行业，新兴产业尤其是纳米技术行业呈现快速发展态势。目前，国家相关部门还难以就纳米功能材料行业准入的基本条件做出详细的说明，但行业内基本可以认定纳米功能材料行业的发展需要满足资金、资源、技术、管理和战略智囊团人才和市场渠道开拓等基本条件。

6.1 资金保障

纳米材料技术属于高技术领域，是研究介观物质的科学。当物质尺寸小到纳米级时，会出现用传统理论和模式无法解释的新现象，很多宏观或微观的定理和定律已不再适用。这些都可能成为导致纳米研究和行业化最终失败的不可控因素。因此，纳米材料和纳米技术的研发和行业化过程具有高投入、高风险、高回报的特点。在研究开发初期阶段，需要前期大量资金的投入，经济效益并不明显，有时甚至没有效益。

我国纳米功能材料发展的经费来源，主要有国家自然科学基金的资助和实行产、学、研相结合的企业资助。根据 2010—2014 年我国在纳米科技的投入资金强度相比的统计结果（图 2-6-1）：我国纳米科技的研发经费，无论是国家自然科学基金还是社会企业资助，呈逐年增长态势，对纳米科技研究开发投入的认识正在逐年增强；而国家自然科学基金的总体资金规模比社会企业资助规模大，在纳米科技科研经费的来源方面，国家自然科学基金仍占 60% 以上。

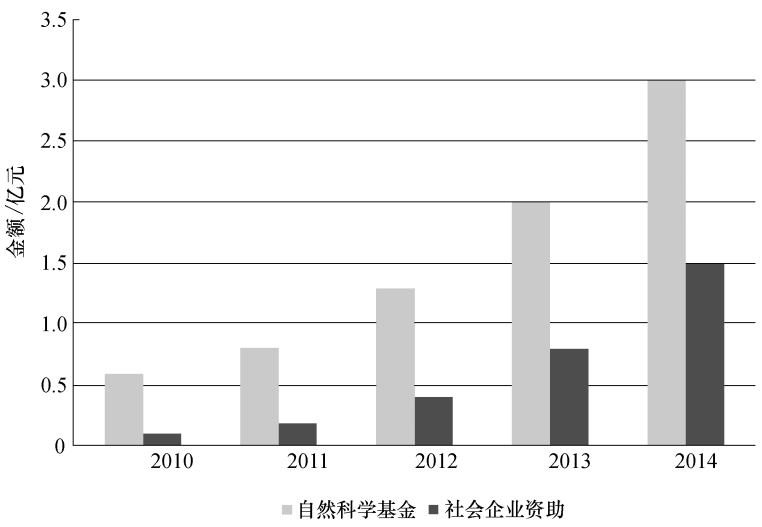


图 2-6-1　2010—2014 年我国纳米科技领域科研经费投入强度比较

资金投入强度相比还显示：社会企业资助增长率比国家自然科学基金的增长率高，这说明近几年来，纳米科技越来越得到社会企业界人士的重视和关注，纳米科技的前景为社会所看好。

为推进纳米技术快速有序的发展，国家和地方政府纷纷设立相应的组织机构和实体：国家纳米科技指导协调委员会、天津国家级纳米技术行业化基地、上海市纳米技术行业化基地、浙江省纳米材料应用工程技术中心、山东省纳米技术工程研究中心、四川国家纳米生物医药材料行业化孵化基地、江苏省纳米材料技术工程中心、沈阳市纳米技术研发与行业园等。扶植院校系统，给予政策倾斜，加大投入力度，鼓励企业参与；整合人力资源，凝聚核心团队，突出研发特色，形成关键项目。应进一步巩固南北方两大中心纳米研究的核心地位，争取在基础研究和应用开发领域获得突破性进展。

对于纳米功能材料行业发展的资金保障，以隶属于江苏省纳米材料技术工程中心的苏州纳米所为例。目前，政府 1 亿元的纳米技术行业发展引导基金，主要用于纳米技术行业投资，推动纳米技术成果加快本地转化、行业化和规模化发展进程，引导创投及社会资本参与后续融资。随着纳米功能材料行业的进程不断推进，企业也必将获益，由此企业也必将大大提高对于行业科研的投入，最后形成与传统行业相似的良性循环，达到产出、研发的相互促进。同时，纳米技术领域的国际合作也日趋活跃，行业合作影响日增。与美、德、芬、以、俄、日、英、加、韩等国建立了多种形式的合作关系；以苏州纳米所为代表的一批科研院校和企业纷纷与国外知名机构、跨国企业开展研发合作，共建实验室和创新合作联盟。越来越多的纳米企业已经跨过研发阶段，筹划着走出入驻时间并不太长的孵化单元，扩建生产线，搬入独立研发楼，建造企业行业化基地，创业领军人才考虑的也不再仅仅是技术攻关，而是市场，是销售，是融资。对很多纳米企业来说，这个变化仅仅用一两年的时间。

江苏省和苏州地方政府目标是建设四大功能载体，加速形成从应用研发到行业化一条龙布局。一是设立中国科学院纳米技术行业研究院。预计总投资约 6.8 亿元，以中科院与江苏省、苏州市、园区共建的方式，加速推动中科院苏州纳米所二期建设，两年内建成 9 万 m^2 工程化办公用房，包括 4 个应用研究所、10 个工程化中心和中试基地、1 个纳米技术学院。二是设立苏州纳米技术国家大学科技园。预计总投资 10 亿元，在科教创新区内规划建设 20 万 m^2 载体，建设开放式、专注于纳米技术领域的大学科技园。三是建设纳米技术创新孵化基地。首期以生

物纳米园已建成的 6.6 万 m^2 研发群楼为主要载体，力争 2 ～ 3 年内打造成为国家级纳米技术行业专业孵化器，3 ～ 5 年内吸引 300 家以上纳米技术相关企业进驻。二期在生物纳米园和科教创新区二期内再规划 14 万 m^2 载体，投资 7 亿元，扩建打造成为纳米技术创新孵化基地。四是规划建设“苏州纳米城”—— 纳米技术行业化基地。预计总投资约 70 亿元，在科教创新区二期内规划建设纳米技术行业化基地，建筑面积 150 万 m^2。

6.2 资源供给保障

纳米功能材料行业主要表现出以纳米新材料、纳米光电子、微纳制造、纳米生物医药、纳米环境治理等纳米技术应用领域为核心的综合发展布局。因此，地方应该建立健全能提供全方位有效支撑服务的综合软、硬件公共服务资源平台，并着力打造支撑纳米技术行业的功能平台，形成以前沿技术研究为依托的纳米技术测试、加工和工程化平台，从而可以向地方乃至全国科研院校和企业提供相关技术支持与服务。

纳米功能材料行业的发展离不开这些基本的资源保障，通常包括基本要素保障、金融保障、人才保障、行业集群和区域合作发展、市场保障等。

1. 基本要素保障

（1）生产要素保障 根据不同的功能定位和容量控制，加强纳米功能材料行业发展所需的水、气、电等生产要素供给保障。

（2）基础设施保障 加快纳米功能材料行业基础设施建设，切实提高行业承载能力，促进行业聚集。加大产品检测、技术研发、商务信息、现代物流等技术、服务支撑平台投入，实施多种模式建设和经营，对引进带动性强、关联度高的纳米功能材料行业投资和研发基地建设项目给予重点支持。

2. 金融保障

拓宽融资渠道，积极引导企业上市。进一步加强银企、银政合作，搭建企业与金融机构项目对接的平台，落实对纳米功能材料行业重点企业、项目的金融扶持。把纳米功能材料行业骨干企业和高成长中小企业纳入上市培育重点，支持中小企业融资服务平台建设。发挥龙头企业的作用，建立纳米功能材料行业保税仓库，以解决中小企业融资难的部分问题。

3. 人才保障

建立良性的引才、育才、用才机制，结合当地纳米功能材料行业发展需要，

有重点地培养和引进重要领域、关键环节的急需人才，重点引进和培养行业顶层人员、研究开发的技术骨干和熟练的技术工人。

4. 大力招商引资，承接行业转移，促进行业集群和区域合作发展

适应全球化条件下生产要素流动和行业转移加快的趋势，大力承接纳米功能材料行业转移，引导招商引资在制造、研发和服务上，在吸引外资和内资上协调发展。一是要创新招商思路，拓展以企招商、以商招商、行业链招商及以“龙头”引“配套”，“配套”引“龙头”等招商方式；二是要有针对性地制定招商引资政策，即针对纳米功能材料行业特点制定特殊政策，针对招商引资主要竞争者制定相应的对策；三要围绕国内外知名公司，鼓励优势企业与其联合；四要建立健全纳米功能材料行业招商引资机构；五要大力开拓网上和中介招商等多种新型的招商方式。

6.3 技术条件

纳米功能材料行业存在一定的行业进入壁垒，除了上述的资金壁垒之外，还具有较高的技术壁垒。目前，绝大多数纳米功能材料都是在传统材料的基础上发展起来的，是传统材料在性能或功能上不断提高的延续。传统材料行业经过几十年的发展已经积累了深厚的技术基础，因此，纳米功能材料从一开始就具有了较高的技术壁垒。

就纳米功能材料的行业化过程而言，可以根据实际的运作过程概况为七个阶段：小试（Ⅰ）、中试（Ⅱ）、工业化生产（Ⅲ）、市场开拓（Ⅳ）、垄断利润期（Ⅴ）、稳定生产期（Ⅵ）和衰退期（Ⅶ），如图 2-6-2 所示。

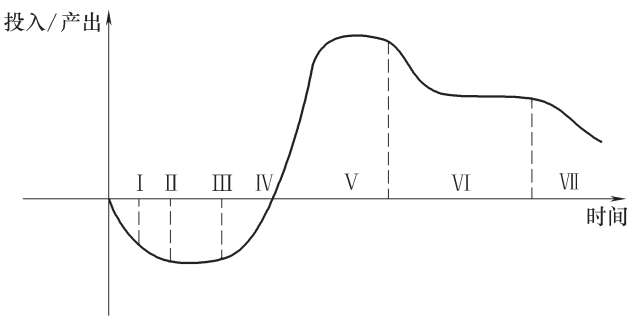


图 2-6-2　纳米材料行业化过程中投入 / 产出比与时间的关系

大多数的纳米功能材料，开始阶段都是在实验室中进行制备，并且初步确定制备的原料、工艺流程并进而对产品进行质量检测。当产品质量合格并稳定后，就可进行小量试制，即上图中的第一阶段 —— 小试阶段。小试阶段的研究重点是对实验室原有的制备路线和制备方法进行全面、系统的改革。通过小试研究改掉那些不符合工业生产的合成步骤和方法，进而找到一条比较成熟的合成工艺路线。另外，小试阶段应弄清楚，用工业级原料和溶剂对反应有无干扰，对产品的产率和质量有无影响，并找出适于用工业级原料生产的最佳反应条件和处理方法。

中试生产阶段是从实验室过渡到工业生产必不可少的关键环节，在这一阶段，对技术的要求更加严格。中试阶段是对小试的放大过程，一般而言，中试阶段的实验规模要比小试放大 50 ～ 100 倍，以便进一步研究在一定规模装置中各部反应条件的变化规律，并解决实验室阶段未能解决或者尚未发现的问题。在中试放大的过程中要解决如下几点：

1）生产工艺路线的修改：小试阶段确定的反应方法和生产工艺路线在中试放大阶段会暴露出许多难以克服的重大问题，需要对生产工艺路线进行修正，这个过程需要较高的技术水平，构成了技术壁垒之一。

2）设备型式的选择：不同于小试阶段较小的实验设备，中试需要体积更大的设备，因此实验过程中，就要充分考虑物料搅拌时产生的传热传质问题，因此，中试阶段就要对反应的实际情况进行探究，进而对设备型式以及搅拌速度等进行修正。

3）反应条件的修正：中试阶段由于设备的变大，导致反应条件发生变化，实验室中最佳的反应条件不适应中试放大要求，因此必须重新对反应条件进行试验研究，掌握反应条件在大型设备中的变化规律，为中试阶段以后的大规模行业化生产奠定良好的基础。

4）物料质量的影响：实验室小试阶段，所用的原料都是化学纯或者分析纯级别，原材料的质量较高，得到的产物质量因此有所保证。但是，在工业化生产阶段，由于原材料使用量较大，原材料的质量级别相应就会降低，中试阶段就要研究工业级原材料对反应有无干扰，对所制备的产品质量有多大影响。

5）经济指标核算，生产成本制定：除了技术方面的进一步研究之外，中试阶段要对各项经济指标，例如原材料用量、电力消耗、工时成本、环保污染等等进行初步核算，掌握生产成本的构成与总额，并据此寻找降低成本措施，为接下

来的大规模工业化生产做好成本准备。

中试阶段过后就进入了工业化生产的阶段，工业化生产阶段工艺路线已经稳定，产率稳步提升，成本开始下降，技术步骤逐渐成形并稳定下来。对于大多数产品的制备过程，其技术壁垒主要存在于以上三个阶段，但是对于纳米功能材料的制备而言，在以上三个阶段存在的技术壁垒又略有不同。

相较于传统材料，纳米功能材料的粒径更小，粒度分布更加无序，比表面积更大，而且形貌也更加多样。对于纳米功能材料而言，形貌决定了其性能，不同形貌的纳米功能材料所表现的性能也千差万别，因此，在纳米功能材料生产过程中的研发是将产物形态作为主要控制的指标，如何对于工艺参数进行有效的调控，进而控制纳米功能材料的形貌是大规模工业化生产的关键。

纳米功能材料的规模化制备前提就是要通过不断的放大过程来摸索工艺参数的变化，并最终实现有效的控制。由于纳米功能材料制备过程中化学反应是快速的瞬时反应，过程受到传递因素的控制，在放大过程中，设备体积的增大使得传递因素变化呈现“非线性”特征，因而放大过程只能依靠小规模试验成功的方法和数据，加上技术人员积累的经验不断适当地加大试验规模，修正前一次工艺参数，逐级的进行放大试验，并最终控制工艺参数的变化规律，为大规模的生产积累技术经验。这种逐级的经验放大试验过程，虽然可靠程度比较高，但是缺乏翔实的理论指导，放大过程中存在的问题各种各样，因此没有统一的解决方法，对企业的技术实力与研发创新能力要求较高，构成了纳米功能材料准入的主要技术壁垒。

新企业在进入纳米功能材料行业的过程中，需要积累较多的技术准备，尤其是在中试放大阶段，技术壁垒尤其繁多，是考验一个新企业研发创新能力的关键阶段，这就需要新企业要有充足的人才储备，尤其是高学历、高素质的人才队伍；除此之外，资本的大量投入也是新企业所要面临的一个重大问题，解决技术问题后，规模化生产需要投入更多的资金，企业需要有持续的现金流支撑才能坚持到垄断利润期，进而获得盈利。

纳米功能材料另外一个重要的技术壁垒就是专利封锁。虽然我国目前有关纳米功能材料的科研论文与专利申请都已经名列世界前列，但是核心专利却大多被国外跨国公司封锁，国内企业很难跨过专利封锁，必须要缴纳巨额的专利费，也为新企业的进入带来了巨大的障碍，除非有颠覆性的技术创新，否则只能受制于人。

6.4 智囊团队、技术人才

纳米功能材料行业是技术密集型、人才密集型的行业，其发展需要大量的高质量、高学历、复合型的人才。纳米功能材料行业需要的从业人员可以简要地划分为三类。

第一类是具有一定专业背景知识的高级经营管理人才。该类人才首先具备一定的纳米功能材料专业背景，其次具备一定的管理学知识，懂得经营企业，熟悉国际管理，对市场有深入理解，对纳米功能材料行业有深入了解。

第二类人才是专业技术人才。这类人才一般要求学历较高，博士、硕士所占比例较大。他们具有较为深厚的理论基础，具备一定的交叉学科知识，深入了解化学、物理、材料等课程的基础知识与项目实践经验，对纳米功能材料的制备、表征以及应用有较为深刻的认识，并且具有一定的创新能力。

第三类是实际操作人员。这类人员不需要具有很高的学历与深厚的知识背景，但是需要接受纳米功能材料制备与安全防护等专门培训，拥有熟练操作的能力，对纳米功能材料有较为清晰的认知和理解。这类人才是纳米功能材料行业系统的支柱，也是不可或缺的一部分。

以上三类人才构成了纳米功能材料行业准入的人才壁垒，对于许多新企业而言，在解决了资金、设备等硬性条件之后，面临的就是人才匮乏的软实力困境。人才的培养非一日之功，不仅需要企业自身的努力，更需要宏观层面国家政策的支持。

纳米功能材料涉及许多学科，因此对目前高校的学科体系提出了较大的挑战。如何将诸多背景学科进行集成，形成新的交叉学科体系，适应纳米科技人才培养的需要是目前各个国家、各个高校面临的一大挑战。解决这一问题，首先需要国家政策的支持，需要政府进场顶层设计、统一规划，鼓励高校和纳米功能材料企业进行产学研的合作，并研究统一培养纳米功能材料人才的机制；同时，政府层面要做好激励措施，积极引导纳米功能材料企业、科研机构与高校的合作，加快人才培养的步伐，并制定有关人才培养与开发的法律法规。

高校层面，要积极进行教育资源的优化配置，促进不同学科交叉融合，为学生提供一个多学科的培养环境，并积极跟进国际纳米功能材料研究方向；加强相关课程的综合性和实践性，与纳米功能材料企业进行合作，为学生提供参观实习的机会，开拓学生的视野。

企业层面，要建立科学严谨的人才培训管理体系，积极吸引国内外优秀的纳

米功能材料领域的专业人才，并为人才提供良好的工作、科研环境，激励他们不断地创新；加大培训投入，拓宽培训范围，严格培训考核制度，为员工技能的提高提供支持。

6.5 市场渠道开拓

纳米技术自从 20 世纪 80 年代出现以来，已经在传统材料、医疗器械、电子设备涂料等领域得到了广泛应用。纳米功能材料的市场交易额也在不断地提高，Freedonia 集团的研究结果指出，全球纳米功能材料的市场交易额到 2020 年将会达到 900 亿美元。Freedonia 集团称短期内，市场对纳米功能材料的需求主要集中在纳米金属和纳米氧化物等材料，但长远看，全球市场对纳米功能材料的需求将集中在新型的纳米材料上面，如树形聚合物、碳纳米管等。

2014 年全球纳米材料区域分布中，北美和欧洲市场占据前两位。欧洲市场上纳米材料多用于医药领域，众多医药公司分布其中。在亚洲市场，由于政府的大力支持、逐渐增强的环保意识和对特殊材料的强烈需求，近年来亚洲纳米科技行业发展迅猛。

建筑材料市场将会成为一个主要的需求市场。世界涂料年总产量达到 2 500 万 t，每人每年消耗接近 4kg，而我国的人均涂料消费仅有 1.5kg，建筑涂料市场具有十分广阔的发展前景。我国每年房屋竣工面积约 18 亿 m^2，若全部采用建筑涂料装饰则共需建筑涂料近 300 万 t，约 200 亿～ 300 亿元的市场规模。纳米功能材料在涂料行业的应用和发展，将进一步促进涂料更新换代，并且会为纳米功能材料的发展提供巨大的市场空间。

电子器件领域，纳米压敏电阻、非线性电阻、微电极、微电容、高聚物薄膜电容等采用纳米功能材料或纳米技术已经在实验室研制成功，这些电子产品将陆续进入规模化生产阶段。

环境与能源领域，利用纳米功能材料光催化技术可以对空气中的氮氧化物、一氧化碳、甲烷等有害气体进行吸附，净化空气。三星公司使用纳米电子功能材料石墨烯制备的触摸屏应用到手机、平板电脑领域，可以代替 ITO，降低成本，有利于环保，降低对不可再生资源的开采。镍氢电池、锂电池和燃料电池中的工作电极开始使用纳米功能材料，提高了能量转换效率与电池使用年限。

化工领域，经纳米功能材料改性的油漆、涂料、橡胶、催化剂、粘合剂等将会陆续进入市场，不仅能进一步提高产品的性能，更能为纳米功能材料行业的发展提供持续的推动力，开拓广阔的市场发展空间。

纳米材料是21世纪各国竞相重点开发的新材料，其技术水平和产业化规模将对高科技的发展和国防建设、传统工业的改造和国力的竞争都将产生重大的影响。为了加快我国纳米材料产业发展，力争在国际高科技纳米材料领域占有一席之地，应对我国纳米基础研究进行整体规划，制定全国纳米材料行业发展规划；按照市场需求确定我国近、中期纳米材料技术开发重点，集中力量优先研究、开发和发展具有自主知识产权、市场潜力大、技术可行的项目和对未来有重大影响的关键领域。总之，纳米功能材料行业的前景非常广阔，市场规模宏大，不仅可以改善我国的行业结构，促进业态的升级换代，更会对我国的经济发展起到推动作用。

第7章　纳米功能材料科技与产业发展战略指导

7.1　我国纳米功能材料发展目标

我国是全球少数几个最先开展纳米技术研究的国家之一。纳米材料系统研究最早始于20世纪80年代末，90年代末开始对纳米器件开展立项研究，21世纪我国纳米技术又聚焦到生物、纳米光电集成器件等技术领域。这些研究获得了国家发改委、国家自然科学基金、中科院、科技部、教育部的鼎力支持。经过近30年的研究和发展，我国已在纳米技术领域获得了一批创新性的研究成果，特别是在纳米材料的制备、隧道显微镜分析和单原子操纵等方面已经与国际水平相接近，在某些领域甚至达到了世界先进水平。

2001年年初，教育部、科技部、国家发改委、中科院、国家自然科学基金委联合发布了《国家纳米科技发展纲要》。同时，为了进一步落实《国家纳米科技发展纲要》精神，科技部再次发布了《国家纳米科技发展框架指南》。根据《国家纳米科技发展纲要》和《国家纳米科技发展框架指南》，各部委分别通过国家“973”计划、“863”计划、“攻关计划”及基金委重大、重点项目，科学院的重大工程项目等对纳米科技进行研发投入。同时，在地方政府的协同支持下，全国已有一半的省市将纳米材料纳入本省发展规划，使得从事纳米科学技术生产和应用的企业如雨后春笋般在全国范围内蓬勃地发展。经过“八五”到“十一五”期间的发展，我国纳米技术获得了长足的发展，至“十一五”结束，我国发表的SCI论文总数世界第一，被引频次位居世界第二。我国纳米科学技术专利授权数量已位居世界第二，并制定了一系列国家和国际标准。

2012年1月2日，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》，规划部署了四大研究计划，纳米研究位列其中。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》指出，纳米科技已成为许多国家提升核心竞争力的战略选择，也是中国有望实现跨越式发展的领域之一。未来15年，我国在这一领域的研究重点将包括纳米材料的可控制备、自组装和功能化，纳米电子学、纳米生物学和纳米医学，纳米尺度表征与度量学，以及纳米材料和纳米技术在能源、环境、信息、医药等领域的应用等。根据规划，我国纳米功能材料当前阶段发展目标主要为：在纳米材料、器件和系统、生物医学、测量表征等方面取得国际一流的原创性成果；在信息、生物医药、能源、环境、制造等重要应用领域取得重大进展；促进纳米绿色印刷制版、高密度存储器、新型显示、疾病快速诊断、水净化、高效能源转化等纳米材料、器件与技术的规模化应用；培养一批高水平的学术带头人并形成在国际上有重要影响的研究团队。纳米科技发展的总体目标是：通过5～10年的努力，形成若干各具特色的、具有国际一流水平的纳米科技创新基地，基本完成我国纳米科技研究与开发创新体系建设，为长远发展奠定基础；大幅度提高我国纳米科技创新能力，使我国在纳米科技领域的整体水平进入国际先进行列，并在若干方面具有竞争优势；一批纳米科技成果实用化或产业化，造就一批具有市场竞争力的纳米高科技骨干企业，促进经济跨越式发展。为实现这一发展目标，我国将通过多方面的具体任务来加以实现。

1. 纳米基础科学问题研究方面

开展纳米基础理论研究，建立纳米结构单元之间相互作用的理论模型，揭示纳米材料构效关系，发展纳米结构加工与制造的新理论、新方法，探讨生命过程中的纳米—生物界面效应及纳米生物医学方向的基本过程与基础理论问题。

2. 先进功能纳米材料

开展多尺度、多层级纳米材料和系统的基础研究，纳米材料及制品服役性能和失效机理分析；在功能纳米结构和材料的构建，以及与之相应的电学、光学、热学、力学性质研究方面开展基础研究；热力学稳定纳米体系的成因、规律和普适性探讨，纳米材料取向结合新机制的动力学研究，表界面作用与纳米材料的相变机制及其稳定性研究。

3. 纳米检测与加工方法、装备与标准

发展新的测量原理、方法，实现纳米尺度基本物性的定量化测量；发展电子学、生命科学、环境科学和能源科学所需要的纳米计量/分析方法；发展纳米标准/参

考物质和相关纳米技术标准，形成纳米技术标准化体系；开展纳米尺度的基本物理量的溯源计量研究；稳定、规模化制备纳米材料的共性装备、技术与标准；高时间分辨、高空间分辨的纳米表征方法和检测设备。

4. 纳米信息材料与器件

发展基于新逻辑、新原理的纳米器件；基于量子效应的器件信息处理理论和纳米器件性能的建模计算；纳米信息材料及器件的关键制造技术；纳米器件规模化制备和质量控制方法；新型纳米电子、光电器件、传感器件与系统；实现微机电向纳机电系统的融合和过渡技术；纳米器件集成与系统的设计、制备方法。

5. 纳米生物与纳米医学

纳米颗粒与生物活性物质的组装方法；针对恶性肿瘤与心脑血管疾病等重大疾病的多功能纳米定向传递系统；组织器官修复与再生用纳米结构植入物和细胞支架；艾滋病、肝炎等重大疾病的快速、低成本检测用纳米材料与器件；医疗器械用纳米材料与器件；组织修复和再生医学等生物医学纳米技术。

6. 环境纳米材料与技术

发展室内空气污染物、工业源有毒有害气体、动力机械尾气的纳米净化材料及催化净化技术，二氧化碳减排和俘获技术；可饮用水和净水处理技术、重金属离子和农药残留的快速检测方法、土壤中重金属离子和有机污染物固定和去除方法、新型纳米过滤材料及技术等；新型可降解塑料、新型自清洁材料、长效化肥和短效农药等。

7. 能源纳米材料与技术

发展纳米晶太阳电池、新型薄膜太阳电池、有机太阳电池、热电电池、超级电容器等技术；在节能减排、新型催化剂、传统燃料高效利用方面的纳米新技术等；石油与天然气开采、运输及综合利用方面的纳米新技术；提高二次电池能量密度、动力型电池寿命，发展高效纳米晶储能材料等。

8. 纳米技术应用与开发

以纳米材料、器件与系统在节能环保、新一代信息技术、生物、农业、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等战略性新兴产业中的关键技术应用为核心。重视纳米技术产品的规范化生产，制定若干重要纳米技术产品标准和安全生产规范。重点发展纳米绿色印刷制版、高密度存储器、新型显示、疾病快速诊断、水净化、高效能源转化等纳米材料、器件与技术的规模化应用和产业化。

9. 纳米技术安全性

在分子和细胞、动物水平上研究纳米材料、纳米药物（制剂）、纳米医学器械以及纳米产品等与靶器官、靶细胞、靶分子相互作用过程；纳米材料在环境中的产生、迁移、聚集等演化行为与安全问题的相关性研究；建立纳米安全性数值分析模型；纳米材料对生命系统作用的安全性评价体系研究；开展纳米材料和器件的安全性预测与防护研究。

7.2 纳米功能材料的变化趋势

1. 纳米技术由基础研究转向实际应用和产业化

纳米技术是 21 世纪高新技术产业的重要基础和制高点，世界各国纳米技术在基础研究和应用研究以及产业化方面的投资持续快速增长，风险基金投资在纳米技术领域逐年增加，纳米技术与微系统在未来的产业化过程中孕育着巨大的市场潜力。

在 21 世纪之前，纳米技术主要停留在基础研究层面，中科院、中国科技大学、北京大学、东南大学、复旦大学、浙江大学等众多高校在纳米材料制备、基础特性方面积极开展了大量的基础研究工作。21 世纪之后，随着纳米技术的逐步成熟，纳米技术逐步向物理、化学、新材料、信息技术、生物技术、医学、国防、能源、农业与食品等多个应用领域渗透，并在多个领域取得了重大进步，纳米技术正从基础研究向应用研究和产业化方向逐渐转移。

2. 纳米技术研发单位由单打独斗向地域合作、国际化发展

纳米技术的发展需要不同地域、不同国家之间的相互协作，地域、国际交流越频繁，合作程度越深，越能促进纳米技术的发展。当前，全球各国均积极开展了不同程度的纳米技术合作和交流，通过政府间的多边关系、双边关系和多种民间通道进行了多种形式的国际合作和交流。采用研讨会方式进行人员交流或学术交流，积极聘请外国专家讲学，开展合作研究。

例如，2007 年 1 月欧盟推出了第七框架计划（FP7），总经费投入达 501.82 亿欧元，其中子领域“国家合作”预算达 322 亿欧元，显著增加了国际合作力度。国家合作领域分为 10 个主题：健康，食品、农业与生物技术，信息通信技术，纳米技术、材料科学和新生产技术，能源，环境和气候变化，交通，社会、经济科学和人文学，安全，空间科学。同时，欧盟决定将根据其承担的国际义务，积极开展纳米科技国际合作。具体而言，一方面要加强国际对话，推动纳米技术在

全球范围内技术标准的制定；另一方面是通过制定通用的纳米科技计量学、专用术语、风险评估等机制以及建立毒理学、生态毒理学和流行病学专门数据库等手段，促进全球技术、资源共享；最后是促进欧盟纳米技术电子出版物的建立，并向全球无偿提供开放，尽最大可能普及并推广纳米技术。

与此同时，美国与欧盟积极签署了多项与纳米材料相关的国际科学与技术合作协议。这表明欧盟和美国的研究人员可以向其资助组织提出合作研究计划。在美国，国际科学与工程局 (OISE) 资助美国参与国际协作。其他国家包括加拿大、智利、阿根廷等也与欧盟签署了国际科学与技术合作协议，同样包括了纳米技术内容。另一方面，西班牙、葡萄牙和所有拉丁美洲国家均在 CYTED IBERO 美洲科学技术发展项目中得到资助。微纳米系统项目可在 ICT 区域下寻求资助。该项目只对西班牙、葡萄牙和拉丁美洲研究者开放。

在国际合作方面，我国同样也不例外。科技部曾在《“十一五”国际科技合作实施纲要》中指出，将纳米技术作为国际合作的战略重点。在纳米技术领域，重点合作包括纳米加工与纳米器件、纳米材料与纳米结构、纳米医学与纳米生物技术、纳米结构的表征方法与检测、纳米器件与集成的关键方法与技术、纳米体系中的理论和建模问题研究等。

3. 纳米材料的应用向生物和电子方面倾斜

经过纳米材料发展初期，纳米技术获得了长足的进步。在此基础上，纳米材料的应用方向向生物和电子方面倾斜，并展现出广阔的应用前景。随着材料、制备方法以及先进检测技术的进步，特别是高精度的纳米功能器件制备技术的逐步应用，纳米技术向电子信息技术与生物技术方面拓展更加明显，如集成纳米光电器件、瞄准纳米生物器件、纳米生物传感器。

纳米生物技术是当前国际纳米技术领域的前沿和热点问题，在医疗领域有着广泛的应用和明确的产业化前景，特别是纳米药物载体、纳米生物传感器、纳米生物成像技术以及微型智能化医疗器械等，将在疾病的诊断、治疗和卫生保健方面发挥重要作用。对于基础研究人员来说，将生物学融入纳米技术是一个热门领域，这一趋势将会导致开发出诸如新奇医学诊断、传感器、数据存储材料以及纳米制造工具等纳米技术产品。目前，国际上纳米生物技术在医药领域的研究已取得了一定的进展。全球范围内，美国、日本以及欧洲发达国家均已将纳米生物技术作为 21 世纪的科研优先项目予以重点支持。

如表 2-7-1 所示，就当前生物芯片技术而言，全球的市场总值 2010 年已达

到 23.27 亿美元，相较 2009 年增长 6%；2011 年，市场总值达到 25 亿美元。据预测 2015 年市场总值将达到 36.73 亿美元，年平均增幅 9.5%。其中基因微阵列型芯片将仍是主流产品，而蛋白质芯片将具有较高的成长潜力。强有力的市场需求为纳米材料在生物技术领域的应用提供了广阔的前景。

表 2-7-1　世界生物芯片市场发展情况　（单位：万美元）

年份	蛋白质芯片	实验室芯片	遗传基因芯片
2007	19 424	60 125	105 618
2008	24 597	69 715	111 746
2009	29 258	76 891	112 525
2010	34 471	84 899	113 366
2011	38 869	91 819	119 312
2012	44 141	100 234	126 707
2013	50 536	110 533	135 883
2014	58 336	123 106	147 120
2015	67 915	138 512	160 852

电子信息技术方面，应用纳米技术制造出的基于量子效应的新型纳米器件将克服电子信息产业发展中的局限，这包括以强场效应、量子隧穿效应等为代表的物理限制和以功耗、互联延迟、光刻等为代表的技术限制，以及制造成本昂贵、用户难以承受的经济限制。具有量子效应的纳米信息材料将提供不同于传统器件的全新功能，从而产生出新的经济增长点。这将是对信息产业和其他相关产业的一场深刻的革命。

这些技术上的突破将全面地改变人类的生存方式，所带来的经济价值是难以估量的。正如美国《新技术周刊》指出的，纳米技术在电子信息产业中的应用将成为 21 世纪经济增长的一个主要发动机，其作用可使微电子学在 20 世纪后半叶对世界的影响相形见绌。

4. 纳米技术领域行业标准竞争日趋激烈

建立标准化系统与知识产权战略密切相关，其意义在于促进知识转移进程，促进技术进入从科学到工程、从实验室到市场的阶段，而目前部分纳米技术标准的不确定性将给纳米技术产业带来诸多不利影响。因此，制定纳米行业技术标准势在必行。标准化成果在于促进纳米技术市场化，促进社会对纳米技术的认可，

使纳米技术更好地服务于社会。针对纳米技术以及相关产业的崛起，世界各国，特别是纳米技术相对发达国家，已明确把标准化工作列入其纳米技术发展战略。

纳米材料标准的研究与制定，目前世界各国正处在起步阶段。为了争夺在纳米材料领域的领导地位，各国已不遗余力地开展纳米技术标准化工作。2002 年，美国正式开启了纳米技术的标准化研究工作，主要针对纳米材料术语、纳米材料性能、实验、测量与表征方法等方面，以满足美国纳米技术研究、开发和商业化的需要。为此，美国国家标准化组织成立了负责纳米技术行业标准开发的新联络组织 —— 纳米技术标准小组 (ANSI-NSP)，该组织于 2004 年 9 月在美国召开了首次纳米技术行业标准工作会议，制定命名法则和术语。同时，美国商务部还拨出专项经费，用于研究开发测量方法和制备标准的基础设施，以支持美国产业界开发纳米技术，实现纳米技术商业化。2005 年美国成立了纳米技术标准委员会，制定了《纳米技术术语》，通过审批，并对外发布。

同样，其他国家如英国也发布了国家标准化战略框架，明确表达了其确保在新技术领域领先地位的愿望，认为通过标准化可以为此打下基础，使其纳米技术在全球市场中获得竞争优势。随后，日本、加拿大等国分别成立了相应的纳米技术标准委员会，并积极促进国际标准化组织 (ISO) 中纳米技术分委员会的建立。

当一些纳米技术先进大国加紧通过制定纳米标准而抢占未来纳米技术市场时，我国也开始开展大量的技术标准工作。比如，在“十五”期间，国务院教科领导小组就已批准重大专项 ——“重要技术标准研究”，该专项由科技部、国家质检总局和国家标准化管理委员会共同组织实施，并着手制定我国第一个纳米产品及技术标准，其中包括了纳米粉体材料及检测技术标准。截至 2009 年 4 月 21 日，已经颁布国家标准 17 项，其中属于全国纳米技术标准化技术委员会归口的 6 项，其他标委会归口的 11 项）；颁布行业标准 4 项。已经有 47 项国家标准制修订计划项目立项，其中上海纳米技术工作组组织上报 17 项。这些标准和措施的实施使我国抢在世界之先发布纳米技术和产品标准成为事实，奠定了我国在相应纳米材料的具体子领域的先进领跑地位，具有重大的现实和战略意义。

纳米产品及技术标准的发布，使我国在纳米技术领域掌握了主动，对于实现新型工业化道路，加强经济结构的战略性调整，促进科技进步和技术创新，推动社会可持续性发展，提高国际竞争力具有重要的现实意义和深远的历史意义。自七项纳米材料国家标准颁布之后，我国已经制定了 16 项纳米技术标准，其中 12 项为国家标准，4 项为行业标准。

7.3 我国纳米功能材料科技与产业的优势领域

在纳米技术快速发展的今天，相对国际竞争对手，我国具有五点相对优势。

第一，我国具有实力较强的研究骨干力量。我国是世界上少数几个从 20 世纪 90 年代就重视纳米材料研究的国家之一，目前已经形成了多支在国际上有影响的、高水平的研究队伍，材料领域在国际上占有一席之地，形成了多个高水平的研究基地。

第二，我国拥有若干种发展纳米材料的矿物资源和生物资源。如我国稀土资源丰富，是我国独有资源，该种材料纳米化以后，可以替代目前汽车上广泛使用的三元催化剂，具有更加优良的性能和更加低廉的成本，具有广阔的应用前景。

第三，我国是一个对纳米产品及技术需求巨大的市场，且研发潜力巨大。我国经济发展不平衡造成了市场的多层次性，不但在高端市场有一定的需求，在低端市场同样有巨大的需求。纳米技术产品的多样性、多层次性，决定了我国将是一个巨大的纳米技术市场。这些因素将有利于我国在纳米材料领域的竞争。据国家统计局数据，2014 年我国城镇居民人均可支配收入 28 844 元，比上年名义增长 9.0%，扣除价格因素实际增长 6.8%。城镇居民人均可支配收入中位数 26 635 元，比上年名义增长 10.3%。全年农村居民人均可支配收入 10 489 元，比上年名义增长 11.2%，扣除价格因素实际增长 9.2%。农村居民人均可支配收入中位数 9 497 元，比上年名义增长 12.7%。可见我国居民收入已普遍得到了提高，城乡差距逐步缩小，我国巨大的市场潜力将得到释放。如图 2-7-1 所示。

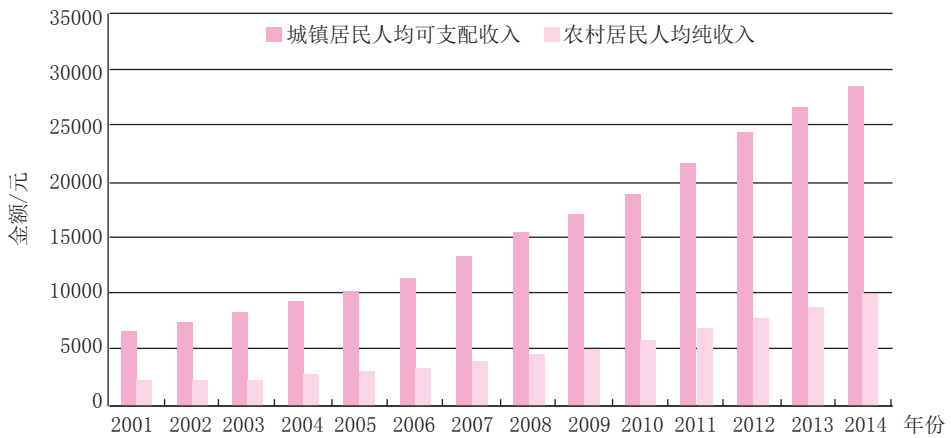


图 2-7-1 中国城乡收入发展情况

数据来源：国家统计局。

第四，我国具有世界上最高的外汇储备和人民币储蓄存款。据中国人民银行发布的消息，我国外汇储备在 2014 年已达到 38 340 亿美元，几乎为外汇排名第二的日本外汇储备量的 3 倍。另外，2014 年 12 月月末，我国人民币存款余额 113.86 万亿元，为我国纳米科技产业的发展提供了充足的资金。

第五，发展纳米技术产业，我国具有劳动力充足、成本低的优势。我国作为后发展国家，劳动力成本远远低于发达国家。欧洲欧盟统计局发布的 2013 年各成员国平均劳动力成本数据显示，欧盟（28 国）平均劳动力成本为 23.7 欧元/小时，欧元区为 28.4 欧元/小时。而我国劳动力平均时薪约为 4 欧元/小时，是欧洲的 1/6，这表明我国在劳动密集型的传统产业上具有相对优势。不仅如此，我国白领阶层的平均工资也远低于发达国家，知识密集型产业在我国同样具有比较大的优势。丰富的劳动力资源成为我国参与国际分工的竞争优势之一。

7.4 我国纳米功能材料重点工程

未来若干年内，我国纳米功能材料重点工程可预测性地将分布在纳米生物、纳米微机械、纳米陶瓷材料以及纳米太阳电池等工程应用技术领域。

1. 纳米生物工程

纳米生物技术是生物技术和纳米技术相结合的产物，主要包括纳米医学、纳米医用材料、生物芯片以及基因工程等具体领域。纳米技术向生物学研究的各个领域广泛渗透，纳米科技与分子生物学的交叉产生了纳米生物技术，这将在单分子水平下探索生命的运动规律。生命过程是已知的化学、物理过程中最为复杂的一种运动形态。当前，纳米生物技术在纳米医学，特别是纳米药品、纳米医用材料、生物芯片技术、基因工程等方面已取得了长足的进步，而这些领域与人们健康、生存有着紧密的联系，拥有巨大的市场，是纳米技术领域下个重要的应用工程之一。种种迹象表明，纳米科技已在医学、生物芯片技术、基因工程等领域表现出广阔的应用前景。

2. 纳米微机械

微电子机械系统已经引起了世界各国的广泛重视，纳米技术的迅猛发展使微型机械的研制与应用成为可能。纳米技术与微机械都属于 21 世纪的核心技术。全球包括大部分技术强国 —— 美国、日本、德国、法国、瑞士、荷兰等都已积极在这方面开展了深入的研究与开发。我国对这一领域的研究也非常重视，并取得了非凡的成果。

相比传统机械，微型机械具有体积小、重量轻、能耗低、集成度和智能化程度高等特点。另一方面微机械并不是传统机械的简单微型化。当尺寸达到微米甚至纳米数量级，材料出现的纳米尺度下的奇异特性赋予了微机械新的特性与生命力。对微机械系统工程的研究与传统机械存在着很大的差异，具有独特的研究体系，是一门崭新的技术领域。

纳米技术的产生为微机械的发展提供了坚实的基础。当前微机械结合纳米材料的发展，主要开发的具体研究领域有：研究微机械中运动变换和动力传递，以及运动过程中动态特性的微机构学；研究微型机械以及构件加工制造技术的纳米加工技术；研究适用于制造微型构件满足其性能的特殊材料，以及在环境影响下的变形和失效规律的纳米材料力学；从原子、分子尺度出发，研究相互运动接触界面上的作用、变化与损伤的纳米摩擦学。

我国目前正积极开展纳米 — 微机械系统的研究。其中，微型驱动器、微型机器人的开发，已列入国家“863”“973”等高技术研究计划中。比如，哈尔滨工业大学研制了电致伸缩陶瓷驱动的二自由度微型机器人，位移分辨率可达 0.01 μm。中科院上海光学精密机械研究所研制出微型器件装配装置。上海冶金研究所研制出直径为 400 μm 的多晶硅齿轮、气动涡轮和微静电电极等。此外，清华大学开展的微器件研究包括微电机、多晶硅梁结构、泵与阀、弹簧等研究，中国科学院长春精密机工研究所的微机械测试技术等都取得了重大的进展。

3. 纳米陶瓷材料

陶瓷材料作为全球材料业的三大支柱之一，在日常生活及工业生产中起着举足轻重的作用。目前，国际陶瓷市场需求最大的建筑陶瓷年贸易额达 50 亿美元，并以每年 12% ～ 15% 的速度增长。

由于存在脆性 (裂纹)、均匀性差、可靠性低、韧性及强度较差等缺陷，陶瓷材料的应用受到了一定的限制。但随着纳米技术的广泛应用，纳米陶瓷随之产生，它克服了陶瓷材料的许多不足，并对材料的力学、电学、热学、磁光学等性能产生重要影响，为陶瓷材料的应用开拓了新领域，使陶瓷材料跨入了一个新的历史时期，所以纳米陶瓷被称为 21 世纪陶瓷。

纳米陶瓷材料是利用纳米粉体对现有陶瓷进行改性，通过在陶瓷中加入或生成纳米级颗粒、晶须、晶片纤维等，使晶粒、晶界以及他们之间的结合都达到纳米水平，使材料的强度、韧性和超塑性大幅度提高。具有优良的室温和高温力学性能、抗弯强度、断裂韧性，使陶瓷具有像金属一样的柔韧性和可加工性，在切

削刀具、轴承、汽车发动机部件等诸多方面都有广泛的应用，在许多超高温、强腐蚀等苛刻的环境下起到不可替代的作用，具有广阔的应用前景。

4. 纳米太阳电池

新能源已成为能源领域的新宠，太阳能尤其受到全球技术领域的关注。作用太阳能开发的主体——太阳电池，当前仍以晶体硅电池为主，占据了光伏市场的 90% 以上。然而晶体硅太阳电池由于工艺复杂、能耗高，成本一直居高不下，无法与传统的水电、火电相竞争。纳米技术一定程度上改观了太阳能的开发与利用。当前世界众多知名大学已开展利用纳米材料改善太阳电池性能与成本的研究，比如美国加州理工、哈佛、普林斯顿等大学积极利用纳米材料作为陷光层，增加光伏材料对入射光的吸收，减少光伏材料的使用，一方面降低了光伏器件的成本，另一方面改善了太阳电池的性能。纳米太阳电池将是新型能源材料的重要组成部分和主要发展方向，并形成新的经济增长点，具有巨大的市场容量，将在解决 21 世纪日益突出的能源危机问题上发挥重要作用。

纳米环境技术将提供绿色化的环保技术和产品，大幅度降低污染，提高人们生存的环境质量，实现材料—环境的良性循环。纳米材料是利用材料在纳米状态下不同于常规材料的各种效应和性能，可以有效降低释放到环境中的废水、废气，减小普通能源方式对环境的影响，对未来的环境问题起着决定性的作用，对环境保护极具经济价值。

参考文献

[1] 倪星元，姚兰芳，沈军，等．纳米材料制备技术 [M]．北京：化学工业出版社，2007．

[2] 李凤生，杨毅，马振叶，等．纳米功能复合材料及应用 [M]．北京：国防工业出版社，2003．

[3] 李玲，向航．功能材料与纳米技术 [M]．北京：化学工业出版社，2002．

[4] 林志东．纳米材料基础与应用 [M]．北京：北京大学出版社，2010．

[5] 鲍里先科，奥西奇尼．认知纳米世界：纳米技术手册 [M]．北京：科学出版社，2014．

[6] 陈乾旺．纳米科技基础 [M]．北京：高等教育出版社，2014．

[7] 车如心．纳米复合磁性材料：制备、组织与性能 [M]．北京：化学工业出版社，2013．

[8] 姜山，鞠思婷．纳米 [M]. 北京：科学普及出版社，2013.

[9] 陈津，魏丽乔，许并社，等．纳米非金属功能材料 [M]. 北京：化学工业出版社，2007.

[10] 陈少伟，林文斌．纳米功能材料 [M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2009.

[11] 慧聪化工网．纳米材料的研究现状和发展前景 [OL]. [2005-01-11].http://www.chem.hc360.com.

[12] 沈良，江国华．磁性纳米功能材料研究进展 [J]. 杭州师范学报：自然科学版，2010（10）：40—45.

[13] 杨英慧．纳米材料商业化现状及展望 [J]. 现代材料动态，2006（11）：4—8.

[14] 董江庆．纳米材料在催化领域的应用 [J]. 化工时刊，2011（5）：41—43.

[15] 张立德．纳米功能材料的进展和趋势 [J]. 材料导报，2003（S1）：1—4.

[16] 郭全珍，吕建国．纳米功能材料领域研究前沿和发展趋势的可视化分析 [J]. 情报杂志，2014（3）：49—53.

[17] 郝春城，崔作林，尹衍升．纳米科技及纳米材料发展的哲学思考 [J]. 青岛化工学院学报：社会科学版，1999（3）：48—51.

[18] 崔大祥，高化建．生物纳米材料的进展与前景 [J]. 中国科学院，2003（1）：20—24.

[19] 尹邦跃．纳米时代——现实与梦想 [M]. 北京：中国轻工业出版社，2001.

[20] 赵新宇．纳米世纪：奇迹、革命与未来世界 [M]. 广州：广州出版社，2001.

[21] 张凯峰．纳米成型理论与技术 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2012.

[22] National Nanotechnology Initiative[OL].[2014.11.14]. http://www.nano.gov.

[23] 中国新材料网．德国开展纳米材料安全性长期研究项目 [OL]. [2014-01-24]. http://www.xcl.net.cn/news/show.php?itemid=12646.

[24] 国家自然科学基金委员会．日本第三个科学技术基本计划的重要政策摘要 [OL]. [2005-10-28].http://www.nsfc.gov.cn/publish/portal0/tab110/info19032.htm.

[25] 平朝霞．北京纳米材料产业发展分析 [J]. 新材料产业，2014(1)：18—22.

[26] 盛景荃．上海：纳米产业步步为营 [J]. 华东科技，2008(1)：64—66.

[27] 光君．浙江成为纳米技术产业化大省 [J]. 浙江化工，2006，37（1）：33.

[28] 姜亚昌．纳米稀土氧化物生产线建成投产 [J]. 稀土信息，2008（2）：17.

[29] 苏植权．广东纳米材料产品及技术状况分析研究 [J]. 广东科技，2006（12）：43—44.

[30] 汪信，刘孝恒．纳米材料化学[M]. 北京：化学工业出版社，2006.

[31] 饶睦敏，黄启明，李伟善．锂离子电池纳米负极材料的研究进展[J]. 电池工业，2008，13（2）：132—136.

[32] 王爱丽．Pt／C催化剂的制备及单电池中的性能测试[J]. 应用化工，2012，41(12):2189—2190.

[33] 张焰峰，李忠，杨书廷，等．微波－胶体法制备PEMFC纳米Pt／C电催化剂[J]. 化学研究与应用，2004，16（4）：527—529.

[34] 温海珍．我国纳米技术产业化的关键是制度创新[J]. 技术经济，2003（6）：4—6.

[35] 中央政府网．国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定[EB/OL].[2010-10-18].http://www.gov.cn/zwgk/2010—10/18/content_1724848.htm.

[36] 工业和信息化部网．新材料产业“十二五”发展规划[EB/OL]. [2010-10-04]. http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11293907/n11368223/14470388.html.

[37] 长沙高新区网．关于促进新材料产业集群发展的若干政策意见[EB/OL]. [2011-06-08].http://www.cshtz.gov.cn/art/2011/6/8/art_156_5143.htm.

[38] 江苏省科学技术发展战略研究院产业技术研究中心网．江苏省新材料产业发展现状及面临的机遇与挑战[OL] [2013-04-25].http://cyzx.jssti.net/Item/420.aspx.

[39] 上海市经济和信息化委员会网．上海市新材料产业“十二五”发展规划[EB/OL]. [2012-10-20].http://www.sheitc.gov.cn/sewgh/656484.htm.

[40] 周明芳．纳米矿物材料的开发现状及存在的主要问题[J]．矿产与地质，2002(4)：103—104.

[41] 李斌，王晓，任耀剑．纳米矿物材料的主要制备方法及应用[J]. 中国科技信息，2007（17）：314—315.

[42] 刘曙光．纳米矿物材料研究进展[J]．中国矿业，2006（11）：88—90.

[43] 杨丹，袁鹏，朱建喜．高岭石－纳米锌复合物的制备与表征[J]. 化工矿物与加工，2011（5）：10—13.

[44] 邓中文，郑玉婴，龙海，等．TiO_2负载管状高岭土光催化剂的制备及其表征[J]. 功能材料，2013（6）：874—882.

[45] 姜三营．高岭土／纳米TiO_2复合光化材料的制备及性能研究[D]. 郑州：郑州大学，2013.

[46] 马智，景瑞芳，姚莹．高岭土纳米管的制备及脱硫性能的研究[J]. 化学工业与

工程，2014（9）：25—30.

[47] 龙海，郑玉婴，郭勇，等．高岭石纳米卷的制备与表征[J]. 无机化学学报，2012（6）：1211—1216.

[48] 潘业才，强颖怀，张生辉，等．我国高岭土矿物纳米材料的开发应用现状及其前景展望[J]．中国非金属矿工业导刊，2008（1）：7—11.

[49] 尹丽文．世界石墨资源开发利用现状[J]．国土资源情报，2011（6）：29—32.

[50] 张强，黄佳琦，赵梦强，等．碳纳米管的宏量制备及产业化[J]．中国科学：化学，2013（6）：642—668.

[51] 马艳芳，李宁．硅灰性能及其再利用的研究进展[J]. 无机盐工业，2009（10）：8—10.

[52] 巴恒静，冯奇，杨英资．粉煤灰、硅灰及纳米硅与C_3S水化反应产物的显微结构研究[J]. 硅酸盐学报，2002（12）：780—784.

[53] 何小芳，卢军太，李小楠，等．硅灰对混凝土性能影响的研究进展[J]. 硅酸盐通报，2013（3）：423—427.

[54] 王迎春，苏黄，周世华，等．水泥混合材和混凝土掺合料[M]. 北京：化学工业出版社，2011.

[55] 施惠生，郭晓潞．水泥基材料科学[M]. 北京：中国建材工业出版社，2011.

[56] 黎良青，蒋正武．稻壳灰在混凝土中应用研究进展评述[J]. 商品混凝土，2010(5)：22—25.

[57] 欧阳东．稻壳灰显微结构及其中纳米SiO_2的电镜观察[J]. 电子显微学报，2003（10）：390—394.

[58] 毛雯婷，屈文俊，朱鹏．稻壳灰在超高性能混凝土中的研究应用进展[J]. 江西科学，2014（2）：66—72.

[59] 庄一舟，郑海彬，季韬．稻壳灰替代硅灰对超高性能混凝土性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品，2012（6）：10—14.

[60] 甘露，刘厚凡，高长华，等．稻壳联产纳米白炭黑与活性炭的研究[J]. 粮食与饲料工业，2007（11）：7—10.

[61] 方放，周建斌，杨继亮．稻壳炭提取SiO_2及制备活性炭联产工艺[J]. 农业工程学报，2012（12）：184—192.

[62] 刘国平，胡朋，邵胜军，等．中国稀土资源在全球地位的评估[J]. 世界有色金属，2011（12）：26—29.

[63] 戴茂华，谢青霞．论我国矿产资源开发生态补偿机制的法律构建－以稀有金属矿开发为例 [J]. 东华理工大学学报：社会科学版，2014（3）：69—74.

[64] 中华人民共和国国土资源部．中国矿产资源报告 [M]. 北京：地质出版社，2013.

[65] 陈莲芳，严良．矿产资源可持续发展研究综述 [J]．科学管理研究，2008（8）：25—29.

[66] 陈国铭．我国矿产资源综合利用潜力和发展对策探讨 [J]．中国矿业，1999（8）：14—17.

[67] 刘兆顺，许文良，杨德明．矿产资源开发的战略环境评价研究 [J]. 地理科学，2006（4）：231—236.

[68] 魏一鸣，徐伟宣，范英．矿产资源开发全局优化决策的多目标集成技术 [J]．系统工程理论与实践，1999（11）：1—7.

[69] 朱必勇．我国矿产资源安全及主要矿产品需求预测研究 [D]. 长沙：中南大学，2007.

[70] 李亚青，贾杲，邢润川．纳米技术及其产业化政策分析 [J]. 科技导报，1998(6):40—43.

[71] 黄鲁成，赵志华，傅晓阳．产品技术成熟度研究综述 [J]. 科学管理研究，2010(2):38—41.

[72] 安茂春，王志健．国外技术成熟度评价方法及其应用 [J]. 评价与管理，2008(2):1—3.

[73] 安茂春．技术成熟度评价及应用 [J]. 计算机测量与控制，2012(12):3277—3278.

[74] 朱军文，沈悦青．我国省级政府海外人才引进政策的现状、问题与建议 [J]. 上海交通大学学报：哲学社会科学版，2013(1):59—63.

[75] 吴帅．我国引进海外高层次人才政策梳理及分类比较 [J]. 第一资源，2013(2):31—40.

[76] 罗贞礼，曹磊．我国新材料产业技术创新方向的选择探讨 [J]. 材料导报，72010(17):101—105.

[77] 于立平．中国纳米材料市场现状及趋势展望 [J]. 商业文化（学术版），2007(4):235.

[78] 新材料在线．二十大未来最有潜力的新材料 [OL]. [2014-10-27].http://xincailiao.com/html/weikandian/lidianchi/2014/1027/1128.html.

[79] 科技时代．评论：如何破解纳米技术产业化难题 [OL]. [2008-01-11].http://tech.sina.com.cn/d/2008-01-11/11531968652.shtml.

[80] 电子变压器资讯网．中国纳米材料市场现状及发展趋势[OL]．[2008-12-08]．http://www.ett-cn.com/New/453.aspx．

[81] 沈哲，代朝猛，张亚雷．纳米材料应用对环境的潜在风险[J]．材料导报，2012（S1）：19-22．

[82] 佚名．清大华研吹响家装市场革命号角 用投资高回报揭开纳米产品的致富面纱[J]．光彩，2007(6)：57．

[83] 赵大友．BOT项目投融资风险分析[J]．经济师，2003(7)：82-83．

[84] 温连青．地方政府投融资平台的风险及其防范[D]．济南：山东财经大学，2013．

[85] 黄军英．发展纳米技术的潜在风险及对策[J]．中国科技论坛，2006(5)：110-113．

[86] 梁治国，罗贞礼，王芳凝．我国新材料行业投融资现状及面临的机遇与挑战[J]．管理，2010（7）：76-80．

[87] 古宏晨．纳米材料行业化重大问题及共性问题[J]．化工进展，2003（12）：1253-1257．

[88] 成弈．新材料行业发展：如何实现技术与市场的全面对接[J]．中国科技投资，2010（9）：29-30．

[89] 宋宏杰，孔寒冰，王沛民．纳米技术行业化的瓶颈与对策分析[J]．科技进步与对策，2001（5）：68-70．

[90] 庞晓华．未来几年纳米材料市场将飞速发展[J]．国外塑料，2005（4）：49．

[91] 许华胜．我国纳米材料行业化机制研究[D]．上海：同济大学，2007：100-101．

[92] 张立德．我国纳米材料研究的现状[J]．中国粉体技术，2001（5）：1-5．

[93] 周思立．新材料行业动态报告[R]．东北证券股份有限公司，2010．

[94] 张立德，牟季美．纳米材料和纳米结构[M]．北京：科学出版社，2002：112-121．

[95] 吴天诚，杜仲良，高绪珊．纳米纤维[M]．北京：化学工业出版社，2003：1-10．

[96] 张立德．超微粉体制备与应用技术[M]．北京：中国石化出版社，2001：82-132．

[97] 吴润，谢长生．粉状纳米材料的表面研究进展与展望[J]．材料导报．2000，14(10)：43-46．

[98] 徐滨士．纳米表面工程[M]．北京：化学工业出版社，2004：15-57．

[99] 卞志昕．小尺寸的大机遇——从美国纳米科技现状看未来[J]．新材料产业，2005（10）．

[100] 于辉，翟庆洲，蔡建岩．纳米材料近年来的研发与应用进展[J]．湿法冶金，2005（2）．

[101] 黄德欢．纳米技术与应用 [M]. 上海：中国纺织大学出版社，2001.
[102] 王中林．从纳米器件到纳米系统 [J]. 汉中科技，2007（1）：60—61.
[103] 张喜梅，陈玲，李琳，等．纳米材料制备研究现状及其发展方向 [J]. 现代化工，2000，20(7)，13—16.
[104] 段春英，周静芳．银纳米颗粒的制备及表征 [J]. 化学研究，2003，14(3)：18—20.
[105] 吴琪琳．利用 STM 技术的原子纳米尺度操作 [J]. 新技术新工艺，2002(4)：47—49.
[106] 李群祥，杨金龙 .STM 图形的理论模拟 [J]. 物理学进展，2000，20(3)：234—242.
[107] 商广义，王琛．扫描探针显微镜在纳米科技中的应用 [J]. 现代科学仪器，1998(1)：77—79.
[108] 白春礼．纳米科技的内涵及其发展趋势 [J]. 武汉理工大学学报：信息与管理工程版，2002，24(5)：5—8.
[109] 李正孝，龚岩．纳米技术在环境保护方面的应用 [J]. 节能与环保，2001(4)：22—24.
[110] 李民乾，张益．纳米科技与其在药学领域的应用前景 [J]. 动物科学与动物医学，2001，18(5)：1—2.
[111] 吴鹏，阎松．生物芯片技术的发展与应用 [J]. 现代电子技术，2003(6)：1—4.
[112] 任红轩，鄢国平．纳米科技发展宏观战略 [M]. 北京：化学工业出版社，2008，119—121.
[113] 易霞，尚永丰．生物芯片技术发展及应用前景 [J]. 中国医院，2003，7(7)：51—55.
[114] 周艳琼，白木．纳米生物工程：纳米技术的重要领域 [J]. 中国医疗器械信息，2001，7(6)：29—33.
[115] 温诗铸，李娜．微型机械与纳米机械学研究 [J]. 中国机械工程，1996，7(2)：17—21.
[116] 马柄和，苑伟政．微机械与微／纳米科技的研究及其发展趋势 [J]. 航空精密制造技术，1997.
[117] 戴遐明．纳米陶瓷材料及其应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2005.
[118] Catchpole K R，Polman A.Plasmonic solar cells [J].Optics Express，2008，16(26)：21793—21800.
[119] Atwater H A，Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. Nature Materials，2010，9(3)：205—213.

第 3 篇

3D 打印材料

第 1 章　3D 打印产业概述

1.1　3D 打印的基本概念

3D 打印技术，又称为增材制造技术，是一项前沿性先进制造技术，被欧美发达国家誉为第三次工业革命的载体，与机器人技术、人工智能技术及纳米技术一起被称为重塑未来制造业的关键技术手段，已在汽车、航空航天、消费电子、医疗卫生、工业设计、文化娱乐等领域得到了一定应用，发展前景广阔。3D 打印技术不仅具有数字化、智能化制造特点，还具有材料利用率高，可通过轻质结构实现应用过程节能，可实现复杂结构制造、个性化制造与网络化制造等优势，是一项典型的绿色智能制造技术。

根据美国材料与试验协会（ASTM）的定义：3D 打印是借助三维数字模型设计，通过软件分层离散和数控成型系统，利用激光束、电子束等方法将金属粉末、陶瓷粉末、塑料、细胞组织等特殊材料进行逐层堆积黏结，最终叠加成型，制造出实体产品。

在概念上，3D 打印同义于工业专业术语中的“增材制造”。“增材制造”的理念区别于传统的“去除型”制造。传统数控制造一般是在原材料基础上，使用切割、磨削、腐蚀、熔融等办法去除多余部分，得到零部件，再以拼装、焊接等方法组合成最终产品，其核心是“减材”或“等材”制造过程。而“3D 打印”与之截然不同，无需原胚和模具，就能直接根据计算机图形数据，通过增加材料的方法生成任何形状的物体，简化产品的制造程序，缩短产品的研制周期，提高效率并降低成本，其核心是“增材”制造过程。

3D 打印通常是采用数字技术材料打印机来实现的，常在模具制造、工业设计等领域用于制造模型，后逐渐用于一些产品的直接制造，已经有使用这种技术打印而成的零部件。该技术在珠宝、鞋类、工业设计、建筑、工程和施工（AEC）、汽车、航空航天、牙科和医疗产业、教育、地理信息系统、土木工程、枪支以及其他领域都有所应用。

1.2　3D 打印的优势分析

优势 1：制造复杂物品不增加成本。就传统制造而言，物体形状越复杂，制

造成本越高；对 3D 打印而言，制造形状复杂的物品成本不增加。这将打破传统的定价模式，并改变计算制造成本的方式。

优势 2：产品多样化不增加成本。一台 3D 打印机只需要不同的数字设计蓝图和一批新的原材料就可以打印许多形状，省去了培训机械师或购置新设备的成本。

优势 3：无须组装。3D 打印能使部件一体化成型，不需要组装，缩短了供应链，节省在劳动力和运输方面的花费。同时，供应链越短，污染也越少。

优势 4：零时间交付。3D 打印可以按需打印。即时生产减少了企业的实物库存，企业可以根据客户订单使用 3D 打印机制造出特别的或定制的产品满足客户需求，新的商业模式将成为可能。如果人们所需的物品按需就近生产，零时间交付式生产能最大限度地减少长途运输的成本。

优势 5：设计空间无限。传统制造技术和工匠制造的产品形状有限，制造形状的能力受制于所使用的工具。3D 打印机可以突破这些局限，开辟巨大的设计空间，甚至可以制作目前可能只存在于自然界的形状。

优势 6：零技能制造。3D 打印机从设计文件里获得各种指示，制造同样复杂的物品，操作 3D 打印机所需要的技能比注塑机少。非技能制造开辟了新的商业模式，并能在远程环境或极端情况下为人们提供新的生产方式。

优势 7：不占空间、便携制造。就单位生产空间而言，3D 打印机的制造能力比传统制造机器更强。3D 打印机调试好后，打印设备可以自由移动，打印机可以制造比自身还要大的物品。较高的单位空间生产能力使得 3D 打印机适合家庭或办公使用，因为其所需的物理空间小。

优势 8：减少废弃副产品。与传统的金属制造技术相比，3D 打印制造金属时浪费量减少，随着打印材料的进步，“净成形”制造可能成为更环保的加工方式。

优势 9：材料无限组合。传统的制造机器在切割或模具成型过程中不能轻易地将多种原材料融合在一起，多材料 3D 打印技术的发展使人们具备将不同原材料融合在一起的能力。

优势 10：精确的实体复制。数字音乐文件可以被无休止地复制，音频质量并不会下降。未来，3D 打印将数字精度扩展到实体世界，扫描技术和 3D 打印技术将共同提高实体世界和数字世界之间形态转换的分辨率，创建精确的副本或优化原件。

以上部分优势已经得到证实，其他的会在未来的一二十年（或三十年）成为

现实。3D 打印突破了原来熟悉的历史悠久的传统制造限制，为以后的创新提供了舞台。

第 2 章　3D 打印材料及其分类

3D 打印材料是 3D 打印技术发展的重要物质基础，材料的性能、种类等因素决定着 3D 打印产品的质量和功能。目前，尽管各国均在大力开展有关 3D 打印材料的研发工作，但与已有的数万种不同性能和用途的材料相比，能够真正实现应用的 3D 打印材料尚存在种类和品种少、性能无法满足各种应用要求等问题。因此，破解材料对 3D 打印技术制约的瓶颈，对于推动 3D 打印技术的发展至关重要。

当前，围绕宏微观结构制造的结构性能、力学性能、生物学性能和物理学性能需求，3D 打印涉及的主要材料有聚合物材料、金属材料、陶瓷材料、复合材料和智能材料等。除此之外，彩色石膏材料、人造骨粉、细胞生物原料以及砂糖等食品材料也在 3D 打印领域得到了应用。

2.1　聚合物材料

1. 热塑性塑料

热塑性塑料指具有加热软化、冷却硬化特性的塑料。其中，应用广泛的是热塑性工程塑料。热塑性工程塑料是指以热塑性树脂为基础原料，加入各种添加剂，在一定温度、压力下可塑制成形，被用做工业零件或外壳材料的工业用塑料，是强度、耐冲击性、耐热性、硬度及抗老化性均优的塑料。热塑性工程塑料是当前应用最广泛的一类聚合物 3D 打印材料，常见的有丙烯腈 - 丁二烯 - 苯乙烯共聚物（ABS）、聚酰胺（PA）、聚碳酸酯（PC）、聚醚醚酮（PEEK）、聚砜（PSU）等。

ABS 材料是快速成型工艺常用的热塑性工程塑料，具有强度高、韧性好、耐冲击等优点，正常变形温度超过 90℃，可进行机械加工（钻孔、攻螺纹）、喷漆及电镀。目前主要是将 ABS 预制成丝、粉末化后使用，应用范围涵盖绝大部分日用品、工程用品和部分机械用品。ABS 材料的颜色种类齐全，在汽车、家电、电子消费品领域应用广泛。近年来，ABS 不但在应用领域逐步扩大范围，性能也在不断提升。借助强大的粘结性、强度，通过改性，ABS 作为 3D 打印材料在适用范围上进一步扩大。2014 年，国际空间站以 ABS 塑料为材料用 3D 打印机打

印了零部件。世界上最大的 3D 打印机材料公司 Stratasys 公司研发的最新 ABS 材料 ABS-M30，专为 3D 打印制造设计，机械性能比传统的 ABS 材料提高 67%，扩大了 ABS 的应用范围。

PA 材料既具有较高的强度，也具备一定的柔韧性，可以直接利用 3D 打印制造设备零件。利用 3D 打印制造的 PA 碳纤维复合塑料树脂零件具有很高的韧度，可用于代替金属工具。世界著名的索尔维公司基于 PA 的工程塑料进行 3D 打印样件，用于发动机周边零件、门把手套件、刹车踏板、燃料过滤器、储油槽、平衡旋转轴齿轮等。用 PA 材料代替传统的金属材料，最终解决了汽车轻量化问题。2016 年，广东银禧科技股份有限公司全面推出 PA 粉末及其复合材料。

PC 材料是真正的热塑性材料，具备工程塑料的所有特性：高强度、耐高温、抗冲击、抗弯曲等。PC 的强度比 ABS 材料高 60%，可作为最终零部件使用。PC 工程塑料的三大应用领域是玻璃装配业、汽车工业和电子、电器工业，其次还有工业机械零件、光盘、包装、计算机等办公室设备、医疗及保健、薄膜、休闲和防护器材等。PC 可用作门窗玻璃，PC 层压板广泛用于银行、使馆、拘留所和公共场所的防护窗，用于飞机舱罩、照明设备、工业安全挡板和防弹玻璃。德国拜耳公司开发的 PC2605 可用于防弹玻璃、树脂镜片、车头灯罩、宇航员头盔面罩、智能手机的机身、机械齿轮等异型构件的 3D 打印制造。此外，PC 材料是一种通过医学卫生认证的白色热塑性材料，具有很高的强度，广泛应用于药品及医疗器械行业，用于手术模拟、颅骨修复、牙科等专业领域。

PEEK 是一种具有耐高温、自润滑、易加工和高机械强度等优异性能的特种工程塑料，可制造加工各种机械零部件，如汽车齿轮、油筛、换档启动盘；飞机发动机零部件、自动洗衣机转轮、医疗器械零部件等。此外，PEEK 具有优异的耐磨性、生物相容性、化学稳定性以及杨氏模量最接近人骨等优点，是理想的人工骨替换材料，适合长期植入人体。因此，将 3D 打印技术与 PEEK 材料结合制造仿生人工骨具有重要的市场前景。

PSU 的熔点为 189℃，是所有热塑性材料中强度最高、耐热性最好、抗腐蚀性最优的材料，通常作为最终零部件使用，广泛用于航空航天、交通工具及医疗行业。PSU 类材料能带来直接数字化制造体验，性能非常稳定，通过与 FORTUS 设备的配合使用可以达到令人惊叹的效果。

2. 热固性塑料

热固性塑料以热固性树脂为主要成分，配合以各种必要的添加剂通过交联固

化过程成形成制品的塑料。热固性塑料第一次加热时可以软化流动，加热到一定温度，产生化学反应和交联反应而固化变硬，这种变化是不可逆的，此后，再次加热时已不能再变软流动了。正是借助这种特性进行成型加工，利用第一次加热时的塑化流动，在压力下充满型腔，进而固化成为确定形状和尺寸的制品。热固性塑料，如环氧树脂、不饱和聚酯、酚醛树脂、氨基树脂、聚氨酯树脂、有机硅树脂、芳杂环树脂等，具有强度高、耐火性好的特点，非常适合利用 3D 打印的粉末激光烧结成型工艺。哈佛大学工程与应用科学院的材料科学家与 Wyss 生物工程研究所联手开发出一种可 3D 打印的环氧基热固性树脂材料。这种环氧树脂可 3D 打印成建筑结构件用在轻质建筑中。

3. 生物塑料

生物医用材料是指用于医疗上能够植入生物体或与生物组织相接合的材料，可用于诊断、治疗，以及替换生物机体中的组织、器官或增进其功能。生物医用材料在 20 世纪 60 年代兴起，80 年代获得高速发展，在临床实践中具有广泛的应用。目前主要的 3D 打印生物塑料材料有：聚乳酸（PLA）、聚乙烯醇（PVA）、聚羟基脂肪酸酯（PHA）、聚对苯二甲酸乙二醇酯 -1,4- 环己烷二甲醇酯（PETG）、聚己内酯（PCL）以及生物基热塑性聚氨酯产品（生物基 TPU）等。

PLA 是一种新型的生物基及可生物降解材料，具有良好的生物可降解性，使用后能被自然界中微生物在特定条件下完全降解，最终生成二氧化碳和水，不污染环境，是公认的环境友好材料。PLA 可生物降解为活性堆肥。它是从玉米淀粉和甘蔗中提取的，而不是化石燃料。新加坡南洋理工大学的 Tan.K.H 等在应用 PLA 制造组织工程支架方面的研究中，采用可降解高分子材料制造了高孔隙度的 PLA 组织工程支架，通过对该支架进行组织分析，发现其具有生长能力。

PVA 是一种可生物降解的合成聚合物，其最大的特点就是水溶性。作为一种应用于 FDM 的新型打印线条，PVA 在打印过程中是一种很好的支撑材料。在打印过程结束后，由其组成的支撑部分能在水中完全溶解且无毒无味，可以很容易地从模型上清除。易生（Esun）推出的 PVC 水溶性支撑材料在国内乃至国际都获得一致好评，在打印过程中，其与 PLA 耗材的配合堪称完美。

PHA 是一种以植物为原料的生物基材料，具有可降解的特性。由于它无毒无害，目前常常被用来制作医学器具、食品包装袋、儿童玩具、电子产品外壳等。回收时，只需像掩埋食品垃圾一样将其掩埋，它便可在土壤中自然降解。不仅如此，它在淡水和盐水中也能像在土壤中一样安静降解，并且不会留下任何颗粒物。

在 3D 打印应用方面，PHA 类似于 PLA，可以将其制成线条应用于 3D 打印机。与 PLA 相比，价格较高并且加工窗口稍窄。

PETG 是以甘蔗乙烯生产的生物基乙二醇为原料合成的生物基塑料，是一种非晶型共聚酯。这种材料具有较好的黏性、透明度、颜色、耐化学药剂和抗应力白化能力。PETG 作为一种新型的 3D 打印材料，兼具 PLA 和 ABS 的优点。在 3D 打印时，材料的收缩率非常小，并且具有良好的疏水性，无需在密闭空间里贮存。PETG 收缩率低、温度低，在打印过程中几乎没有气味，在 3D 打印领域具有更为广阔的开发应用前景。

PCL（聚己内酯）具有良好的生物降解性、生物相容性和无毒性，被广泛用作医用生物降解材料及药物控制释放体系，可运用于组织工程，已用做药物缓释系统。PCL 材料是一种可降解聚酯，熔点较低，只有 60℃左右。与大部分生物材料一样，常常用于特殊用途 —— 如药物传输设备、缝合剂等，同时，PCL 还具有形状记忆性。由于熔点低，在 3D 打印中不需要很高的打印温度，达到节能的目的，也可以有效避免人员操作时的烫伤。目前业内人士正在着力研究 PCL 熔点低的优异特性，并且希望借助这种特性制造出儿童打印机。另外，PCL 材料具有形状记忆的特性，使得打印出来的东西具有“记忆”，在特定条件下可以恢复到原先设定的形状。

生物基 TPU 是一种新一代的可再生资源，含量高达 60%，具有优异的机械性能、冷绕曲性、抗水解性和良好的粘着力、耐磨耐压、方便加工回收、密度比石油基的 TPU 低，是一种轻质且成本效益高的原材料，可替代石油基热塑性聚氨酯和热塑性弹性体使用。在 3D 打印领域，作为一种弹性线条材料，具有很广泛的应用，如打印鞋子、手环等。

4. 光敏树脂

光敏树脂由聚合物单体与预聚体组成，其中加有光（紫外光）引发剂（或称为光敏剂），在一定波长的紫外光（250 ～ 300nm）照射下能立刻引起聚合反应完成固化。光敏树脂一般为液态，其良好的液体流动性和瞬间光固化特征，使之成为用于高精度制品打印的 3D 打印耗材首选材料。光敏树脂固化速度快、表干性能优异，成型后产品外观平滑，可呈现透明或半透明磨砂状态。光敏树脂具有气味低、刺激性成分低等特征，非常适合个人桌面 3D 打印系统。目前，研究光敏材料 3D 打印技术的主要有美国 3D System 公司和以色列 Object 公司。

5. 高分子凝胶

高分子凝胶具有良好的智能性，海藻酸钠、纤维素、动植物胶、蛋白胨、聚丙烯酸等高分子凝胶材料用于 3D 打印，在一定的温度及引发剂、交联剂的作用下进行聚合，形成特殊的网状高分子凝胶制品。离子强度、温度、电场和化学物质变化时，凝胶的体积也会相应地变化，可用于形状记忆材料。凝胶溶胀或收缩发生体积转变，用于传感材料；凝胶网孔的可控性，可用于智能药物释放材料。

2.2 金属材料

近年来，3D 打印技术逐渐应用于实际产品的制造，其中，金属材料的 3D 打印技术发展尤其迅速。在国防领域，欧美发达国家非常重视 3D 打印技术的发展，不惜投入巨资加以研究，而 3D 打印金属零部件一直是研究和应用的重点。3D 打印所使用的金属粉末一般要求纯净度高、球形度好、粒径分布窄、氧含量低。目前，应用于 3D 打印的金属粉末材料主要有铝合金、模具钢、不锈钢、钛及钛合金、钴铬合金、镍基合金等，此外还有用于打印首饰用的金、银等贵金属粉末材料。

1. 铝合金（AlSi12、AlSi10Mg）

AlSi12 是一种具有良好热性能的轻质增材制造金属粉末，典型的应用是制造薄壁零件如换热器或其他汽车、航空航天和航空工业级的原型及生产零部件，硅/镁组合带来强度和硬度的显著增加。AlSi10Mg 铝合金适合制造薄壁、复杂的几何形状的零件，是满足良好热性能和低重量场合要求的理想的应用材料。佳能公司利用 3D 打印技术制造出了顶级单反相机壳体上的镁铝合金特殊曲面顶盖。

2. 模具钢（H13）

模具钢的适用性来源于其优异的硬度、耐磨性和抗变形能力以及在高温下保持切削刃的能力。高硬度和耐磨性使得 H13 适用于许多模具（注塑模具、轻金属合金铸造、冲压和挤压），也应用于各种高性能的工业工程部件（航空航天、高强度机身部件和赛车）。

3. 不锈钢（316L）

不锈钢粉末是金属 3D 打印经常使用的一类性价比较高的金属粉末材料，适合打印尺寸较大的物品。奥氏体不锈钢 316L 以其耐空气、蒸汽、水等弱腐蚀介质和酸、碱、盐等化学浸蚀性介质腐蚀而得到广泛应用。316L 可在很宽的温度

范围内下降到低温，可应用于航空航天、石油、天然气等多种工程，也可用于食品加工和医疗等领域。3D 打印的不锈钢模型具有较高的强度。

4. 钛 Ti 及钛合金 Ti6Al4V

钛是一种重要的结构金属，钛合金因具有强度高、耐蚀性好、耐热性高等特点而被广泛用于制作飞机发动机压气机部件以及火箭、导弹和飞机的各种结构件。钛和钛合金以其优异的强度和韧性、耐腐蚀、低比重、生物相容性在航空航天和汽车交通等许多高性能工程中的应用非常理想，而且还用于生产生物医学植入物，强度高、模量低、耐疲劳性强。采用 3D 打印技术制造的钛合金零部件，强度非常高，尺寸精确，能制作的最小尺寸可达 1mm，而且零部件力学性能优于锻造工艺生产的产品。英国的 Metalysis 公司利用钛金属粉末成功打印了叶轮和涡轮增压器等汽车零件。此外，钛金属粉末耗材在 3D 打印汽车、航空航天和国防工业上都将有很广阔的应用前景。

5. 钴铬合金（Co28Cr6Mo）

钴铬合金是一种以钴和铬为主要成分的高温合金，这类合金具有高强度、优良的耐腐蚀性、良好的生物相容性、无磁性的特性。高耐磨性、良好的生物相容性、无镍（镍含量＜ 0.1%）组成，使其常用于外科植入物包括合金人工关节、膝关节和髋关节，也可用于发动机部件、风力涡轮机和许多其他工业部件以及时装行业、珠宝等。采用 3D 打印技术制造的钛合金和钴铬合金零部件，强度非常高，尺寸精确，能制作的最小尺寸可达 1mm，零部件力学性能优于锻造工艺生产的产品。

6. 镍基合金（In625、In713、In718）

In625 在温度高达 815℃条件下依然保持优良的负载性能和耐腐蚀性能，广泛应用于需要高点蚀、缝隙腐蚀和耐高温的行业，例如航空航天、化工和电力工业。In713 具有优异的抗热疲劳性能以及在 927℃下的特殊断裂强度，非常适用于喷气发动机燃气轮机叶片。In718 是基于铁镍硬化的超合金，具有优异的耐腐蚀性以及良好的耐热和拉伸、疲劳、蠕变性能，满足各种高端应用包括飞机涡轮发动机和陆基涡轮机（叶片、环、套管、紧固件和仪表零件）。

7. 稀贵金属

3D 打印的产品在时尚界的影响力越来越大。世界各地的珠宝设计师受益最大的就是将 3D 打印快速原型技术作为一种强大且可以方便替代其他制造方式的创意产业。在饰品 3D 打印材料领域，常用的有金、纯银、黄铜等。

2.3 陶瓷材料

陶瓷材料具有高强度、高硬度、耐高温、低密度、化学稳定性好、耐腐蚀等优异特性，在航空航天、汽车、生物等行业有着广泛的应用。陶瓷材料硬而脆的特点使其加工成形尤其困难，特别是复杂陶瓷件需通过模具来成形。模具加工成本高、开发周期长，难以满足产品不断更新的需求。

3D 打印用的陶瓷粉末是陶瓷粉末和某一种粘结剂粉末所组成的混合物。由于粘结剂粉末的熔点较低，激光烧结时只是将粘结剂粉末熔化而使陶瓷粉末粘结在一起。在激光烧结之后，需要将陶瓷制品放入到温控炉中，在较高的温度下进行后处理。陶瓷粉末和粘结剂粉末的配比会影响到陶瓷零部件的性能。粘结剂分量多，烧结比较容易，但后置处理过程中零件收缩比较大，会影响零件的尺寸精度；粘结剂分量少，则不易烧结成形。颗粒的表面形貌及原始尺寸对陶瓷材料的烧结性能非常重要，陶瓷颗粒越小，表面越接近球形，陶瓷层的烧结质量越好。陶瓷粉末在激光直接快速烧结时液相表面张力大，在快速凝固过程中会产生较大的热应力，从而形成较多微裂纹。目前，陶瓷直接快速成型工艺尚未成熟，国内外正处于研究阶段，还没有实现商品化。

2.4 复合材料

美国硅谷 Arevo 实验室 3D 打印出高强度碳纤维增强复合材料。相比于传统的挤出或注塑定型方法，3D 打印通过精确控制碳纤维的取向，优化特定力学性能、电性能和热性能，严格设定其综合性能。由于 3D 打印的复合材料零件一次只能制造一层，每一层可以实现任何所需的纤维取向。结合增强聚合物材料打印的复杂形状零部件具有出色的耐高温和抗化学性能。Arevo 使用该材料有望打印更轻、更强、更持久的航空航天、国防和医疗应用的零部件产品。Solvay 公司将空客鉴定合格的三个等级的 KetaSpire PEEK 树脂用于制造飞机内饰。复合材料中的强化相除了使用碳纤维外，还可以用玻璃纤维。空客之前鉴定合格的苏威公司的 Radel R-7000 PPSU 树脂是专门制作飞机内饰的材料。

2.5 智能材料

智能材料结构又称机敏结构（Smart/Intelligent Material and Structure），在外界环境刺激下，如电磁场、温度场、湿度、光、pH 值等，可将传感、控制和驱动三种功能集于一身，完成相应的反应。智能材料结构具有模仿生物体的自增值

性、自修复性、自诊断性、自学习型和环境适应性。

智能材料分类方式繁多，根据功能及组成成分的不同，可大体分为：电活性聚合物、形状记忆材料、压电材料、电磁流变体、磁致伸缩材料等。智能材料结构在众多领域有着重要应用，如航空航天飞行器、智能机器人、生物医疗器械、能量回收、结构健康监测、减震降噪等领域。

然而，由于智能材料制造工艺的复杂性，传统智能材料制造方法只能制造简单形状的智能材料，难以制造复杂形状的智能材料结构，智能材料的传统制备方法严重限制了智能材料结构的发展与应用。最近发展的智能材料 3D 打印技术使制造任意复杂形状的智能材料结构成为可能，最新提出的 4D 打印技术将 3D 打印技术与智能材料结构结合起来，智能材料结构在 3D 打印基础上在外界环境激励下随着时间实现自身的结构变化。

3D 打印电活性聚合物材料：电活性聚合物材料（EAP）是一类在电场激励下可以产生大幅度尺寸或形状变化的新型柔性功能材料，是智能材料的一个重要分支。离子聚合物 - 金属复合材料 (IPMC)、Bucky Gel 和介电弹性材料 (DE) 分别是 EAP 的典型代表。制造三维复杂形状电活性聚合物结构是该领域的重要研究课题。

Bucky Gel 是最新研究发展的一种离子型电活性聚合物智能材料。Bucky Gel 的组成和驱动传感原理类似于 IPMC。Bucky Gel 由三层结构组成，中间基体材料为由聚合物和离子液体构成的电解质层，基体材料两边为由碳纳米管、聚合物和离子液体构成的电极材料，在两侧电极加载电压时，离子液体中的阴阳离子向两个电极移动，引起 Bucky Gel 的弯曲。传统 Bucky Gel 的制备常采用溶液铸膜法，分层分别固化电极和基体层，制备出的 Bucky Gel 大多为片状，难以制备复杂形状的 Bucky Gel。N.Kamamichi 于 2008 年提出用 3D 打印技术制造 Bucky Gel，利用 3D 打印技术逐点累加固化电极—基体材料—电极，可以制备任意复杂形状的 Bucky Gel。利用 3D 打印技术可以克服传统制备方法的缺陷，制造任意形状 Bucky Gel 智能材料结构。该课题组利用 3D 打印技术制造手形状的 Bucky Gel。

形状记忆材料：包括形状记忆合金（SMA)、形状记忆胶体（SMG）、形状记忆聚合物（SMP) 等。形状记忆材料最大的特点是具有形状记忆效应，将其在高温下进行定型，在低温或常温下使其产生塑性变形，当环境温度升至临界温度时，变形消失并恢复到定型的原始状态。这种加热后又恢复的现象称作形状记忆效应。

2.6 其他 3D 打印材料

除了上面介绍的 3D 打印材料外，目前用到的还有彩色石膏材料、人造骨粉、细胞生物原料以及砂糖等材料。

彩色石膏材料是一种全彩色的 3D 打印材料，是基于石膏的、易碎、坚固且色彩清晰的材料。基于在粉末介质上逐层打印的成型原理，3D 打印成品在处理完毕后，表面可能出现细微的颗粒效果，外观很像岩石，在曲面表面可能出现细微的年轮状纹理，因此，多应用于动漫玩偶等领域。

3D 打印技术与医学、组织工程相结合，可制造出药物、人工器官等用于治疗疾病。

加拿大正在研发的“骨骼打印机”，利用类似喷墨打印机的技术，将人造骨粉转变成精密的骨骼组织。打印机会在骨粉制作的薄膜上喷洒一种酸性药剂，使薄膜变得更坚硬。

美国宾夕法尼亚大学打印出来的鲜肉，是先用实验室培养出的细胞介质生成类似鲜肉的代替物质，以水基溶胶为粘合剂，再配合特殊的糖分子制成。

还有尚处于概念阶段的用人体细胞制作的生物墨水，以及同样特别的生物纸。打印的时候，生物墨水在计算机的控制下喷到生物纸上，最终形成各种器官。

食品材料方面，目前，砂糖 3D 打印机 CandyFab4000 可通过喷射加热过的砂糖，直接做出具有各种形状、美观又美味的甜品。

第 3 章　国外 3D 打印材料研究与产业发展现状

工业是实体经济的主体，也是转变经济发展方式、调整优化产业结构的主战场。从国际上看，欧美发达国家“再工业化”进程加快，高端制造业不断回流。为重振经济，2012 年美国奥巴马总统提出“国家制造业创新网络”计划，将 3D 打印确定为方向之一，并成立国家增材制造创新研究所，建立一个由产、学、研共同组成的合作平台，致力于增材制造技术和产品的开发。美国《时代》周刊也将 3D 打印列为“美国十大增长最快的工业”。欧洲的大学、企业和政府实体之间建立了众多包括跨国的增材制造技术联盟，有许多大型合作计划获得了政府资助。

目前，3D 打印原材料大多数是设备工艺厂商针对各自设备的特点定制。虽

然定制的材料设备适用性增强，研制难度比较小，但材料的产业通用性会变差，产品成型后的强度也会变得比较低。所以，制作工艺对原材料的依赖性有着非常重要的作用。

Wohlers Report 指出：3D 打印可用的材料包括钢、钛、铝、镍、铜、银、金、钴，金属是 3D 打印市场需求最强劲的材料，目前价格比较昂贵。许多公司开发新的合金用来满足新的增材制造工艺，像激光烧结、粘结喷射和电子束熔炼。航空航天、汽车和能源部门投资金属增材制造，都集中在领先的金属 3D 打印公司如 ExOne、LayerWise 和 EnvisonTEC，它们将拉动金属材料的需求。此外，陶瓷和一些价格比较实惠的材料会越来越受欢迎，报告认为它们的需求将继续上升。

报告同时指出：3D 打印材料市场适度分散，3D 系统、Stratasys 公司、雅骏和 ExOne 在生产和供应上占近 75% 的份额，也更好地掌握了这个特定行业的需求，竞争主要体现在价格、产品范围以及先进技术等方面。

纵观全球，材料产业经过多年的发展，已经逐渐渗透到国民经济、国防建设和社会生活的各个方面，支撑着一大批高新技术产业的发展，对国民经济的发展具有举足轻重的作用，成为各个国家抢占未来经济发展制高点的重要领域。据《Wohlers Report 2015》统计，2014 年，全球 3D 打印材料销售收入 6.4 亿美元，其中金属粉销售收入 0.487 亿美元，增速保持在 50% 以上。2015 年，3D 打印技术的应用领域主要包括汽车、医疗、工业、教育、航空航天等。报告显示，在今后 5 年中，电子产品和汽车工业的 3D 打印应用将进一步扩大和深入，具有巨大的市场潜力。众多 3D 打印企业中，在 3D 打印材料方面有突出表现的企业分别是：3D Systems、Stratasys、ExOne Gmbh、SLM Solutions GmbH、Voxeljet AG、Concept Laser GmbH、Arcam AB 等。国外 3D 打印材料研究与产业发展现状主要表现为以下三点。

1. 研发起步早，投入多

3D 打印技术最早起源于 19 世纪末的美国，在 20 世纪 80 年代得以实现，并逐步发展。目前，3D 打印技术在欧美等发达国家发展迅速，在技术应用和市场推广方面抢占了先机。比如美国的 3D Systems、Stratasys，德国的 EOS 三家公司占据全球 3D 打印市场 70% 的份额。此外，作为 3D 打印技术的关键，材料的研发与应用受到发达国家的高度重视。一些主要发达国家非常重视新材料产业的投入和发展，纷纷出台各项利好政策，鼓励加大材料的研发投入。美国政府在 1991—1995 年的《国家关键技术报告》中将材料科学与技术列为重要的研

究领域；德国自 1994 年就启动了跨世纪国家级材料科学研究计划，实施周期为 1994—2003 年；日本也一直强调材料及时的发展，把开发材料科学列为国家高新技术的第二大目标，认为材料技术是推动 21 世纪创新和社会繁荣的主导力量。2011 年，美国出台《材料基因组计划》，计划投入超过 1 亿美元支持材料创新，缩短材料研发周期，降低材料研发成本，以满足 3D 打印技术和先进制造业发展的需求；2012 年成立的美国国家增材制造创新研究所陆续投入大量资金来研究 3D 打印材料的可持续性，开发生产 3D 打印材料的工艺及设备，开发 3D 打印材料数据库等。欧洲航天局重视 3D 打印金属材料的研发，出台“将 3D 打印带入金属时代”计划，支持宇宙飞船、飞机等金属材料的研发。澳大利亚制定了“金属 3D 打印技术路线”，同时成立中澳轻金属联合研究中心，加强 3D 打印金属材料的研发。

2. 3D 打印材料种类多，技术较成熟

经过几十年的研发，3D 打印材料种类呈现多样化的发展趋势。目前，3D 打印材料主要使用金属材料中的钛合金、钴铬合金、不锈钢等，高分子材料中的工程塑料、光敏树脂、橡胶等以及陶瓷材料。欧美发达国家不断加强 3D 材料种类的研发和更新，可供 3D 打印使用的材料日趋丰富。比如，世界领先的 Stratasys 公司一直注重材料组合的多样性，截至 2012 年该公司可以支持 123 种材料进行 3D 打印。该公司开发出的高级模拟聚丙烯材料 ——Endur，可用于制造非常坚韧的零件。美国宾夕法尼亚大学用细胞生物原料打印出鲜肉，康奈尔大学用特殊的胶原蛋白凝胶打印人体器官，硅谷 Arevo 实验室研发出碳纤维增强材料用来打印更轻更强的零部件。

3. 3D 打印材料市场应用领域不断得到拓展

随着信息、材料、生物技术的快速融合发展，3D 打印材料在电子、航空航天、汽车、生物等部件制造领域得到了验证性应用。特别是在欧美等发达国家，3D 打印材料制备、生产工艺、装备制造、软件设计、创意服务和应用的相关产业链形态已经形成，为 3D 打印材料的市场应用奠定了基础。目前，航空零件制造和医学领域是 3D 打印材料应用较为广泛的领域，如空客和波音都用钛合金 3D 打印出飞机用零件，GE 用铝化钛材料 3D 打印出发动机涡轮叶片，英国南安普顿大学采用 3D 打印技术成功制造出一架小型无人驾驶飞机，科学家还利用 3D 打印技术和多光子聚合技术 3D 打印出了人造血管。可以预计，未来发达国家 3D 打印材料应用领域会进一步得到拓展，市场需求也将大大增加。

第4章　我国3D打印材料研究与产业发展现状

从国内来看，我国3D打印技术的研究与应用基本与国际同步开展，部分高端技术具有国际领先水平，并在满足国家重大需求方面发挥出重要作用，但我国3D打印整体技术水平与产业发展落后于欧美先进国家。在工信部的支持下，我国于2012年10月成立了中国3D打印技术产业联盟，2013年5月在北京成立了世界3D打印技术产业联盟。工信部、科技部等部门多次组织3D打印技术产业发展研讨会，科技部在04专项和“863”计划指南中均列入了3D打印技术内容，以突破3D打印制造技术中的核心关键技术，开展重点装备产品研制。

2012年被称为“3D打印元年”，2012年世界3D打印技术产业产值约30亿美元，我国3D打印技术产业产值仅约10亿元，尚处于起步阶段。尽管产业规模尚小，但近几年将是3D打印技术产业高速成长期，3D打印技术将对我国其他产业转型升级发挥巨大的推动作用。2013年，武汉、南京、青岛、珠海等地先后建立了3D打印技术产业园、3D打印技术产业创新中心。福建省出台了《关于促进3D打印产业发展的若干意见》，明确提出到2015年建成3D打印研发平台和产业化示范基地，到2020年培育10家以上产值超10亿元企业，形成较为完整的3D打印产业链，年产值超过200亿元。

目前，我国3D打印技术产业主要集中在沿海地区，尽管地处西部的重庆地区早在上世纪末已开始在汽摩、模具、工业设计等行业应用3D打印技术，但在对3D打印技术认识、普及与推广、关键技术研发、产业形成等方面存在较大差距。

4.1　3D打印材料产业规模及应用现状

据IDC Japan统计，2015年，中国3D打印材料市场规模达到0.7亿美元，其中金属打印材料市场规模已达到770万美元。中国3D打印技术产业联盟执行理事长罗军预计，到2020年3D打印产业有望实行全面产业化，未来3～5年是中国3D打印材料产业发展的重要发展期。

3D打印对原材料的要求比较苛刻，满足除光固化技术以外的大部分3D打印工艺的适用性要求的材料需要以粉末或丝棒状形态提供。材料融化后在软件程序

驱动下，自动按设计工艺完成各切片的凝固，使材料重新结合起来，完成成型。由于整个过程涉及材料的快速融化和凝固等物态变化，对适用的材料性能要求极高，从而材料成本居高不下。

3D 打印技术包括快速原型制造技术和金属构件直接制造技术两大类，目前公众了解的 3D 打印成果和案例大多属于快速原型制造技术范畴。其实快速原型制造的范畴比较广，除了 3D 打印还有熔融沉积制造、选择性激光烧结、立体印刷、叠层实体造型等多种方式。因此，3D 打印并不能完全涵盖快速原型制造，而只是实现快速原型制造的路径之一。另外一个分支是高性能的金属零件直接制造，这一领域可谓意义重大，但难度也更大，对材料和设备的要求极其苛刻，是 3D 打印技术的制高点。

1. 快速原型制造用材料

快速原型制造即通常所说的快速成型，近年来应用不断拓展，发展极为迅速，已成为工业模型设计与制作中的一项关键技术。最早主要是做树脂、石蜡、纸等原型件，用途集中在新产品的快速设计方面。该技术可以简便、快速地实现设计的优化和产品的评估，其“所见即所造”的特点能够省去大量生产准备环节，显著缩短新产品的研发周期，最终使新产品的研发成本显著降低。近年来快速成型加入选择性激光烧结工艺，使 3D 打印在保持高效率的同时，制造精度也得到显著提升。

目前 3D 打印快速成型用特种粉体材料大多是设备工艺厂商针对各自设备特点定制的，优点是与专属设备的适用性好、研制难度相对小，缺点是材料的产业通用性差、产品成型过程的精度有待提高、产品成型后的强度较低。可见，制品表面精度受粉末原材料特性的制约明显，工艺对材料依赖性不容忽视。

2. 高性能金属构件直接制造技术用材料

高性能金属构件直接制造技术起步于 20 世纪 90 年代初，工艺难度比较大，主要采用高功率的能量束如激光或电子束作为热源，使粉末材料熔化，冷却结晶后形成严格按设计制造的堆积层，堆积层连续成型，形成最终产品。到目前为止，工业上的小型金属构件直接制造相对容易，体积较大的金属构件的直接制造难度非常大，对材料和工艺控制的要求很高。这将是增材制造产业推动相关工业发展的重点方向，也将是一项关键技术。这项技术最大的难点在于材料和成型工艺。以钛合金为例，激光熔化后的材料凝固会造成钛合金体积收缩，造成巨大的材料热应力，内应力对小型构件影响不大，但随着零件尺寸的增加，成型变得非常困

难，即使能够成型也会由于大内应力严重影响材料强度。第二个难题是材料冷却结晶过程复杂。材料结晶过程很难定量控制，一旦出现晶体粗大、枝晶等必将造成材料成型后力学性能不佳等问题，最终结果就是关键构件没办法获得实际应用。

高性能金属构件直接制造技术自问世伊始，就与配套材料的发展密不可分。高性能金属构件直接制造用特种粉末要求低氧含量和高球形度，行业内主要通过气雾化和真空雾化工艺制备，其中真空雾化制备的粉末具有氧含量低、球形度高、成分均匀等特点，应用效果最佳。近年来，金属构件直接制造所使用的高性能特种粉体材料备受关注，这种材料主要是钛及钛合金粉末材料和镍基或钴基的高温合金类粉末材料。欧美等国已经比较成熟地实现了小尺寸不锈钢、高温合金等零件的激光直接成型，未来高温合金、钛合金材质大型金属构件的激光快速成型将成为主要技术的攻关方向。我国北京航空航天大学团队在这一领域走在了世界前列。他们通过激光直接制造成套装备的研制和对大型钛合金金属结构件成形原理的探究，已掌握高性能金属构件直接制造核心技术，其成果已应用于多种型号飞机的研制中。但国内用于金属构件直接制造的材料主要依赖进口，国产化的同类材料目前还存在氧含量高、球形度差、成分均匀性差以及粒度分布不佳等问题，这在一定程度上限制了我国高端 3D 打印产业的进一步发展。

4.2 3D 打印材料科技与产业现行政策

2012 年 10 月，中国 3D 打印技术产业联盟成立，2013 年，中国 3D 打印技术产业创新中心（南京、潍坊、珠海）相继成立。2013 年，3D 打印入选国家“863”计划，国家提供 4 000 万元作为研究基金来支持 3D 打印核心技术的发展，北京投入 15 亿元支持 3D 打印技术。在地方政府层面，南京、武汉、珠海、青岛、成都、长沙等地都筹建了 3D 打印产业园，并在资金、土地、配套政策上给予支持。

2015 年，工信部正式发布《国家增材制造产业发展推进计划（2015—2016 年）》，从国家战略高度提出 3D 打印的发展方向和目标。该计划将针对 3D 打印产业链中各关键环节如材料、工艺、设备和标准中的核心技术瓶颈进行布局，实现技术上的快速发展，达到国际先进水平。同时，还将通过需求牵引与创新驱动相结合、政府引导与市场拉动相结合、重点突破和统筹推进相结合、3D 打印技术和传统制造技术相结合的方式，来推进我国 3D 打印产业健康有序发展。和欧美国家 3D 打印战略计划相比，该计划更加突出了技术创新和政府政策对产业发展的促进作用，这将为我国追赶欧美 3D 打印的领军地位提

供强大的保障。

该计划提出要着力突破增材制造专用材料，依托高校、科研机构开展增材制造专用材料特性研究与设计，鼓励优势材料生产企业从事增材制造专用材料研发和生产，针对航空航天、汽车、文化创意、生物医疗等领域的重大需求，突破一批增材制造专用材料。针对金属增材制造专用材料，优化粉末大小、形状和化学性质等材料特性，开发满足增材制造发展需要的金属材料。针对非金属增材制造专用材料，提高现有材料在耐高温、高强度等方面的性能，降低材料成本。到2016年，基本实现钛合金、高强钢、部分耐高温高强度工程塑料等专用材料的自主生产，满足产业发展和应用的需求。

当前，在加快转变经济发展方式的新常态下，我国政府提出了“中国制造2025”发展战略，努力实现由“制造大国”向“制造强国”的转变，这正是3D打印给包括材料供应、智能制造在内的相关行业带来的重大机遇。业内人士认为，“十三五”期间，3D打印将深刻影响制造企业的生产方式，引领制造业从标准化和精益化生产步入定制化生产。

4.3 3D打印材料科技与产业发展存在的问题

在3D打印快速成型方面，研发和生产通用性更强的材料是技术提升的关键。解决好材料的性能和成本问题，将更好地推动我国快速成型技术的发展。我国3D打印材料发展起步晚、底子薄，需要加大投入和研发力度，以适应国内市场发展的需要，提高国际竞争力。3D打印材料国产化势在必行。

我国自20世纪90年代开始3D打印技术的自主研发，清华大学、华中科技大学、西安交通大学、北京航空航天大学等在3D打印设备制造技术和材料技术等方面进行了积极的探索和大胆的尝试，取得了一定的成绩，部分技术甚至处于世界领先水平，如北京航空航天大学的王华明教授团队3D打印出世界最大的钛合金复杂构件，产品整体性能优于传统锻件。尽管如此，我国在3D打印材料特性、材料制备装备开发方面与国外相比仍有一定差距，3D打印材料还存在以下问题，亟待改进。

1. 3D打印材料供给不足

材料是3D打印的关键，决定着3D打印技术的应用和发展。目前，我国具备生产3D打印材料能力的企业较少，大部分3D打印材料依赖进口，特别是金属粉末材料严重受制于他国。此外，与美国、德国等3D打印材料技术比较成熟

的国家相比，我国 3D 打印材料质量不稳定、品种较为单一，部分研发的实验材料也依赖进口。

2. 材料成本高昂

3D 打印材料制造成本高是目前存在的普遍问题。由于 3D 打印材料种类有限、材料专用性较强、下游应用市场还没有完全培育起来，所以现阶段 3D 打印材料无法实现规模化生产，生产成本居高不下。除了上述原因之外，我国 3D 打印产业的发展还受到国外垄断因素的影响。在高性能金属构件直接制造方面，需要低氧含量、细粒径、高球形度的钛及钛合金粉末或镍基、钴基高温合金粉末，粉末粒度以 -500 目为主，氧含量宜低于 0.1%，且粒径均匀，目前高端的合金粉末和制造设备还主要依靠进口。而国外常将原材料与设备捆绑销售，赚取大量的利润。以镍基粉末为例，原材料成本约 200 元 /kg，国产产品售价一般为 300 ～ 400 元 /kg，而进口粉末售价常在 2 000 元 /kg 以上，这大大增加了我国使用 3D 打印材料的成本，直接限制我国 3D 打印产业的发展，进而影响我国 3D 打印材料整个市场的发展。

3. 3D 打印材料的产业化应用不充分

由于我国 3D 打印产业还处于发展的初期阶段，3D 打印市场还不成熟，大规模生产尚未形成，国内针对 3D 打印技术用粉末开展的研究相对较少，如粉末成分、夹杂、物理性能对 3D 打印相关技术的影响及适应性。因此针对低氧含量、细粒径粉末的使用要求，尚需开展粉末成分设计、细粒径粉末规模化制备技术、粉末特性对制品性能的影响等研究工作。国内受制粉技术所限，目前细粒径粉末制备困难，粉末收得率低、氧及其他杂质含量高，在使用过程中易出现粉末熔化状态不均匀，导致制品中氧化物夹杂含量高、致密性差、强度低、结构不均匀等。国内合金粉末存在的主要问题集中在产品质量和批次稳定性等方面，包括：①粉末成分的稳定性（夹杂数量、成分均匀性）；②粉末物理性能的稳定性（粒度分布、粉末形貌、流动性、松装比等）；③成品率问题（窄粒度段粉末成品率低）等。综上所述，目前大部分 3D 打印材料都是由快速成型厂家直接提供，第三方供应通用材料的模式还没有形成。此外，我国 3D 打印材料主要用于科研，因此已有的材料技术积累都在高校，但高校在技术产业化方面缺乏市场运营的经验，即使 3D 打印材料研发成功，也因“产学研”相结合的脱节而导致无法实现规模化生产。

4. 我国缺少 3D 打印材料方面的实施标准

由于 3D 打印材料多为小批量、个性化生产，所以我国还没有建立起有关 3D

打印材料的行业共性标准。比如，3D 打印对粉末材料的粒度分布、松装密度、氧含量、流动性等有很高的要求，但国内还没有成形的行业标准可以参照，间接增加了材料特性选择上的时间成本。再比如，我国还没有医用领域 3D 打印材料的标准，医用材料都需要经过严格认证且准入门槛较高，必须经过一定时期的临床试验后才能获得许可使用。然而，由于投资回报周期较长，直接挫伤了企业研发与生产的积极性。

因此，当前的迫切任务之一是建立 3D 打印材料的相关标准，加大对 3D 打印材料研发和产业化的技术和资金支持，提高国内 3D 打印用材料的质量，从而促进我国 3D 打印产业的发展。

4.4 我国 3D 打印材料领域发展的风险分析

1. 材料种类少

理论上，所有的材料都可以用于 3D 打印，但目前主要以石膏、光敏树脂、塑料为主，很难满足大众用户的需求。工业级的 3D 打印材料更是十分有限，目前适用的金属材料只有十余种，而且只有专用的金属粉末材料才能满足金属零件的打印需要。目前在工业级打印材料方面存在的问题主要是：①可适用的材料成熟度跟不上 3D 打印市场的发展；②打印的流畅性以及材料的强度不够；③材料对人体的安全性与对环境的友好性的矛盾；④材料标准化及系列化规范的制定。

2. 材料价格高及研发难度大

根据不同的用途，金属材料制备的工件要求强度高、耐腐蚀、耐高温、比重小、具有良好的可烧结性等。同时，还要求材料无毒、环保，性能要稳定，能够满足打印机持续可靠运行。最重要的是，需突破 3D 打印材料价格较高的瓶颈问题，以促进 3D 打印技术的大规模推广及应用。

原材料价格降低只能通过关键技术的突破实现，但难度比较大，在一些特殊领域要求非常高。比如在医学应用领域要做到无毒无害的同时还要做到生物相容性等，技术要求非常复杂，金属粉末的制备技术缺乏大量深入的研发攻关。

3. 市场认可度低

近年来，客户的需求在不断提高，要求越来越精细化，对材料的成分、工艺性、杂质含量等都要求更高。由于信息结构的不对称，国内企业对国产材料的技术含量和水平认可度较低。

第5章　3D打印材料科技与产业发展战略

3D打印技术的核心在于材料，突破材料对3D打印技术的限制，有利于促进3D打印产业的快速发展。目前，我国3D打印材料产业虽然处于刚起步阶段，材料研发和应用水平与欧美等发达国家相比还有差距，但是，加大对3D打印用材料的投入和研发，走独立自主的发展之路，对我国抢占新一轮制造业发展制高点意义重大。推进我国3D打印材料技术与产业发展的措施主要包括：

1. 加强我国3D打印材料的供给保障

多样化的材料来源和稳定的材料供给是3D打印产业发展的根本。保障我国3D打印材料的供给，一方面要加强我国国内3D打印材料的研发和生产，发挥政府的引导调控作用，通过设立重大专项或建设重大工程，鼓励现有材料生产企业加大3D材料的研发投入，吸引更多企业参与3D打印材料的生产，逐步降低对关键3D打印材料的进口依赖，提高我国的自给率；另一方面，要加大国外原料供给渠道的开拓力度，鼓励国内企业积极“走出去”，与美国、德国等3D打印材料领先企业建立合作关系，加强联合研发生产；也可以将优秀企业“引进来”，引导国外企业在国内投资建厂，扩大我国3D打印材料的供给渠道，确保我国3D打印材料的供给稳定。

2. 加大材料的深度研发和产学研合作

3D打印产品的质量和特性取决于材料，不仅材料本身种类、成分、特性对3D打印产品的特性有影响，材料的制造工艺也对3D打印产品的强度、模量、弹性等功能特性起到决定性作用。因此，要加大材料研发投入力度，将材料工艺与3D打印工艺开发相结合，将配套材料的研究与3D打印技术的研究相结合，实现材料与3D打印技术同步研发，打破材料对3D打印技术制约的瓶颈，从而带动3D打印技术实现质的飞跃。一方面，要发挥高校科研机构的科研优势，利用已有的技术积累，加强与企业的交流合作，了解企业和市场需求，推动3D打印材料科研成果的产业化应用；另一方面，要发挥企业的市场主体作用，加大企业研发投入，扩大3D打印材料的生产规模，与高校科研机构共建研发平台或实验室，共同攻克关键共性技术，通过加强产学研的合作，提高我国3D打印材料研发应用水平。

3. 推动 3D 打印产业上下游领域全方位的合作

3D 打印材料的产业化应用必须与 3D 打印设备、下游 3D 打印产品同步进行，即加强上下游各个环节的研发生产合作，带动 3D 打印材料的产业化应用，方能取得突破性的进展。鼓励 3D 打印材料企业积极与 3D 打印设备生产商、3D 打印产品生产商合作，研发生产有市场前景的 3D 打印材料，支持有实力的材料企业向下游拓展延伸产业链，开发 3D 打印设备或生产 3D 打印产品，形成“材料—制造—装备—应用”协同发展的全产业链发展模式，带动 3D 打印产业整体发展，进而推动 3D 打印材料的产业化应用。

4. 建立、完善 3D 打印材料支持政策和标准

对于处于产业化发展初期的 3D 打印材料产业，加强政府支持和规范行业标准是必要的。加大政府对 3D 打印配套的材料企业的政策和资金扶持力度，对研发生产 3D 打印材料的企业给予税收减免或财政补贴，鼓励企业积极进行材料研发；政府还可以通过采购相关产品对市场进行引导，推动 3D 打印材料产业壮大发展。与此同时，联合研究机构、材料生产企业等多方力量，加快 3D 打印材料规范性标准的制定和修订，建立并完善 3D 打印材料技术标准体系，开发 3D 打印材料质量测试程序和方法，同步开展 3D 打印产业上下游各环节、各类产品标准的制定，最终形成 3D 打印产业领域标准的全面覆盖。

5. 加大 3D 打印材料专业化、高层次研发人才培养力度

加大力度培育造就 3D 打印材料高层次研发人才，尤其是领军人才。充分调动研究机构、高等院校、企业的积极性，培养一批 3D 打印材料研发的骨干人才团队，建立过硬的研究开发队伍。充分利用海外华人智力资源，大力引进高层次人才。加强相关专业人才的教育与培训，培养 3D 打印材料专业人才。引进培育具有强烈创新意识的经营管理人才。

参考文献

[1] 黄卫东 . 如何理性看待增材制造(3D打印技术)[J]. 新材料产业,2013(8):9–12.
[2] 黄树槐 . 快速成形技术的展望 [J]. 中国机械工程，2000，11 (1) :195–200.
[3] 刘光富，李爱平 . 快速成形与快速制模技术 [M]. 上海：同济大学出版社，2004.
[4] 王忠宏，李扬，张曼茵 . 中国 3D 打印产业的现状及发展思路 [J]. 经济纵横，2013，28 (1) ：90–93.

[5] 黄立本，张立基，赵旭涛 .ABS 树脂及其应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2001：312—313.

[6] 贾玉珍 . 聚碳酸酯技术现状及发展趋势 [J]. 化工文摘，2007 (2)：46—49.

[7] 翟缓萍，侯丽雅，贾红兵 . 快速成型工艺所用光敏树脂 [J]. 化学世界，2002，43 (8)：437—440.

[8] Ladd C，So J H，Muth J，et al. 3D printing of free standing liquid metal microstructures[J]. Advanced Materials，2013，25(36)：5081—5085.

[9] 颜永年，齐海波 . 快速制造的内涵与应用 [J]. 航空制造技术，2004 (5)：26—29.

[10] 黄秋实，李良琦，高彬彬 . 国外金属零部件增材制造技术发展概述 [J]. 国防制造技术，2012 (5)：26—29.

[11] 黄因慧，田宗军，高雪松，等 . 难加工材料激光快速成形的研究现状与展望 [J]. 航空制造技术，2010 (21)：26—29.

[12] 张剑光，韩杰才，赫晓东，等 . 制备陶瓷件的快速成型技术 [J]. 材料工程，2001 (6)：37—40.

[13] 魏凤春，张恒，张晓，等 . 智能材料的开发与应用 [J]. 材料导报，2006 (S1)：375—378.

第 4 篇

电磁流变材料

第1章 概 述

1.1 基本概念

电磁流变材料是一类由功能性悬浮相、悬浮介质和添加剂组成的胶体或分散体材料，在外加电场或磁场作用下其流变性能或模量发生明显变化并可实现连续精确的控制，是近年来发展迅速的一类新型机电耦合智能流体材料，可作为计算机控制和机械执行机构的连接纽带和动力传输媒介构成智能结构或驱动器件。电磁流变材料主要包括磁流变液（Magnetorheological Fluid，MRF）、电流变液（Electrorheological Fluid，ERF）、磁流变弹性体（Magnetorheological Elastomer，MRE）、磁性液体（Magnetic Fluid，MF）、磁流变塑性体（MRP）、磁流变胶（Magnetorheological Gel，MRG）等。其中磁流变液已在车辆智能减振悬架系统和光学器件智能抛光技术方面获得商业化应用。

1.2 电磁流变材料的特点及分类

1.2.1 磁流变液

磁流变液是一种由微米级铁磁性悬浮相、悬浮介质和添加剂组成的分散体材料，在外磁场作用下其流变性能发生明显变化并可实现连续精确的控制，是一种理想的智能流体材料，目前的应用最为成熟。用磁流变液取代传统阻尼器中的液压油并辅以磁场发生装置构成磁流变液阻尼器，其阻尼力变化连续可调，可实现半主动减振（震）控制。美国 Lord 公司的磁流变液的技术水平国际领先，代表性参数如下：磁场下屈服应力范围为 25 ～ 70kPa，零场粘度为 30 ～ 100mPa·s，温度范围一般为 -40 ～ 150℃，航空航天应用为 -55℃，品质因数（τ_{MR}^2/η_0）为 10^{10} ～ 10^{11}Pa/s，响应时间小于 1ms，车辆用磁流变液阻尼器耐久性运行公里数大于 150 000km 或台架振动试验次数大于 2×10^6 次（2Hz+边载）。

1.2.2 电流变液

电流变液是一般由纳米到微米尺度的高介电常数的固体微粒分散于低介电常数的液态基体后所构成的悬浮体系，在电场作用下其流变性能发生急剧变化，液体的表观粘度成数量级增长，其流变性能可由外加电场精确控制。用电流变液取

代传统阻尼器中的液压油并辅以电场发生装置构成电流变阻尼器，其阻尼力变化连续可调，可实现半主动减振（震）控制。与磁流变液相比，由于早期的电流变液屈服应力较低且易受污染，其商业化应用进程相对缓慢，近年来在材料的优化和制备技术方面有了很大的发展，已制备出了屈服应力达100kPa的巨电流变液。在材料的微观机理研究方面也不断提出新的模型，如巨电流变效应的饱和极化模型和极性分子模型等。

1.2.3 磁流变弹性体

磁流变弹性体是将微米尺度的铁磁性颗粒掺入到高分子聚合物中，在磁场环境下固化，从而基体内的颗粒具有链或柱状结构。这种材料的弹性模量可随外加磁场强度而变化，因此有望在变刚度器件等方面得到广泛的应用。磁流变弹性体具有可控性、可逆性、响应迅速、稳定性好等优点，可应用于汽车、火车、舰船等运载工具的减振降噪，人工肌肉等。实验室研制的硅橡胶基磁流变弹性体在磁场作用下，剪切模量相对变化可达878%，系目前已知磁流变弹性体模量变化的最大值。但是硅橡胶磁流变弹性体机械性能很差，尚未达到工程上的应用要求。

1.2.4 磁性液体

磁性液体是由纳米铁磁或亚铁磁微粒均匀分散于一定的非磁性基液中形成的胶体体系，它具有液体的流动性和固体磁性材料的磁性，是一种独特的超顺磁性纳米功能材料。磁性液体按抗团聚作用机理可分为两种类型：表面活性剂型和离子型磁性液体。前者是将表面活性剂包裹于磁性纳米微粒表面，通过空间位阻作用防止团聚，使微粒稳定的分散于基液中。后者则是通过微粒表面带有同种电荷产生的静电斥力达到抗团聚的目的，其制备方法又可分为Massart法和自形成法。磁性液体的磁流变效应明显低于磁流变液，但由于其独特特性，近年来已成为国际电磁流变学会议的重要内容。磁性液体不仅在传统的磁密封、声学设备阻尼、传感器、磁分离等方面有重要的应用，在现代光学、生物医学、靶向药物等领域也有广阔的应用前景。

1.2.5 磁流变胶

磁流变胶是将磁性颗粒分散到凝胶基体中，形成一个性能较磁流变液更为稳定的胶状体系，其力学性能在外加磁场下同样可以迅速地发生变化。在设计器件时，其密封性要求较低。磁流变胶与磁流变液的主要区别是其中加入了胶质物，胶质物在载流液中形成的网状结构，一部分吸附在磁性颗粒表面，一部分分散于载流液中。这一方面使得颗粒重力平均分布在基体中，从而显著地提高其沉降稳

定性；另一方面颗粒表面的网状结构加大了颗粒间的距离，从而减弱了范德华力，降低了颗粒的团聚，分散性好。它在显著提高沉降稳定性、保持磁流变液优异磁流变效应的同时，又具有一些特殊的性能，如通过调整磁流变胶中胶的含量可以使它的零场粘度连续变化，从而得到介于磁流变液与磁流变弹性体之间的磁流变材料，表观粘度和剪切模量可以发生显著的变化，满足不同应用场合的需要。由于磁流变胶具有这些优异的性能，目前正逐渐成为研究热点，并已在振动控制中得到应用。但是，目前磁流变胶还存在一些问题，如制备过程较复杂，成本较高，屈服应力低等。

1.2.6 其他材料

除了上述的电磁流变材料之外，近年来发展的剪切增稠液体（STF）和磁流变塑性体也都具有一定的代表性。剪切增稠材料在常态下十分柔软，一旦遇到高速的冲撞或挤压，材料变得坚硬从而耗散掉外力。当外力消失后，材料会回复到最初的柔软状态，具有极强的吸收冲击的能力。由于剪切增稠效应对剪切应变率敏感，因此工作时不需要外加磁场或电场，由这种材料研制的器件属于无源器件，在防护及抗冲击等领域有广阔的应用前景，如防弹织物材料等。由这种冲击硬化材料与磁性颗粒构成的复合材料，同时具有磁流变效应和剪切稠化的双重功能。磁流变塑性体类似上述的磁流变胶，为柔软的聚合物复合材料，除具有良好的抗沉降稳定性和高磁流变效应外，还有由法向力产生的较强磁致伸缩效应，导致磁场下电导率、热导率、声波传导明显变化。

1.3 电磁流变材料的发展历程

电磁流变材料的起源应追溯到 20 世纪 50 年代。电流变现象最早由 Winslow 于 1945 年发现，因此被称为 Winslow 效应，而磁流变液的概念于 1948 年由 Rabinow 首先提出。电磁流变材料的初期发展始于 20 世纪 90 年代初期，伴随着智能材料和结构技术的发展而重新受到重视。代表性的电磁流变材料和器件的专利集中在美国及部分欧洲国家的企业和大学，如美国的 Lord 公司、Maryland 大学、Virginia 大学、Rochester 大学和 QED 公司等。美国 Delphi 公司开发的 Magneride 磁流变阻尼悬架系统获得了 1999 年度世界 100 大科技成果奖，开始与通用汽车公司合作，在 Cadillac 高档轿车上试用。90 年代末，美国航空航天局、美国海军实验室、美国陆军实验室等机构开展了电磁流变材料在军事领域的应用研究，包括舰炮和机载炮后坐阻尼控制、航天器太阳能帆板的振动控制、机载电子

设备减振和军用装甲车辆减振技术等研究。电磁流变材料中的磁流变液及应用技术率先于 2008 年在 Cadillac 等 16 种高档轿车智能减振和光学器件智能抛光方面获得成功的规模化发展和商业化应用。从 2002 年第一辆搭载 MRC（Magnitc Ride Control）主动式电磁悬挂技术的凯迪拉克 SevilleSTS 上路，到 2015 年搭载第三代 MRC 的凯迪拉克 XTS 上市，该技术在经历近 13 年的进化后愈发成熟，其传感器可以最快每秒 1 000 次的频率侦测路面状况，并实时调整悬挂阻尼系数。目前，磁流变技术的多元化应用已在车辆智能减振、土木工程智能减震、现代光学系统智能抛光、军用装备智能减振、轨道车辆的振动控制、磁密封技术等方面展开。国际电磁流变学会议每两年召开一次，2014 年第十四届国际电磁流变液学术会议在西班牙的 Granada 召开。

第 2 章　国外电磁流变材料发展现状

2.1　电磁流变材料科技与产业规模

目前美国磁流变液年产量已达到数百吨，磁流变器件年产量约数百万套，且每年仍以较快的速度递增。已在 Cadillac、雪佛兰 CorvetteC6、法拉利 599GTB、奥迪 TTS、别克 Lucerne、Audi A3、Porsche 等多种高端品牌轿车、重型载货汽车和军用特种车辆、土木工程等方面成功实现商业化应用，如轿车磁流变悬架控制系统、磁流变风扇离合器、磁流变发动机悬置，火神系列火炮、Humvees 和 Strykers 装甲车辆等磁流变减振系统等。磁流变智能抛光技术在复杂精密光学器件加工方面也成功实现商业化应用。磁流变抛光（MRF）技术由美国 Rochester 大学和 QED 公司在 20 世纪 90 年代开发成功，很好地解决了大口径光学平面、球面，特别是非球面的超精密加工技术难题，并在美国 Omega/ICF/NIF 等激光约束装置中获得成功应用。

2.2　电磁流变材料发展潜力

2.2.1　电磁流变材料科技与产业发展现状

美国磁流变技术的发展受到军方机构（NASA、AFRL、TACOM、ARL）等的持续资助，磁流变振动控制技术及智能抛光技术除在汽车、装甲车、桥梁、精密光学器件方面已获商业化应用外，在舰炮后坐阻尼控制、直升机旋翼、航天器

仪器平台、太阳能帆板、飞机起落架等阻尼控制方面的研究也在不断深入。美国Delphi 公司开发的汽车磁流变阻尼悬架系统（Magneride）获得 1999 年度一百大科技成果奖。美国已能按 ISO 9000 质量体系标准生产系列磁流变液产品及阻尼器件，具备理想的耐久性能。在高档轿车和重型载货汽车的磁流变智能减振、精密光学器件的磁流变智能抛光技术等方面已获商业化应用。磁流变智能减振技术在重要军用装备的应用已完成环境试验评价，系统具有优良的耐久性和可靠性。美国Lord公司的磁流变液产品具有完备的安全和绿色认证数据。组成产品的载液、铁磁相、无机添加剂等材料均可回收和降解或再生，无毒副作用，制造工艺无公害。

在磁流变液材料方面，美、德、日、法、俄、韩、印度等国家的一些重要研究机构和大学及企业在不同程度上开展了该领域的技术理论及应用技术研究，取得显著进展。Carlson 等建立了磁流变液的寿命评估方法，提出了磁流变液的“使用稠化”（IUT）问题。对普遍关注的高剪切速率下磁流变液的工作状态进行了实验研究，明确提出耐久性和综合性能是辨别磁流变液优劣的重要指标。Ulicny 等通过磁流变液耐久性失效实验分析了其原因和规律。Klingenberg 等通过磁流变液 Poiseuille 流模拟实验分析了零场和磁场下悬浮相的受力状态，从而得出悬浮相表面处理和摩擦力对磁流变液性能的影响规律，认为减小摩擦力能明显改善“使用稠化”。Bossis 和 Marting 等从理论和实验研究了悬浮相粒度和形状因素对磁流变液性能的影响规律，将纤维状悬浮相引起磁流变液剪切应力成数倍的提高归因于磁场下纤维间摩擦力的提高。Ben Hu 采用高分子聚合技术处理悬浮相表面，明显提高磁流变液的再分散性和高温稳定性。Bombard 等开展了基于离子液体的磁流变液的摩擦学特性研究。韩国 Choi H.J 等在电磁流变液研究方面采用石墨烯制备成壳核结构悬浮相，提高了电流变效应、分散性和抗沉降性。另外，美国Delphi 公司、Lord 公司、GM 公司等分别从提高稳定性、耐久性、相容性、润滑性和磁流变效应角度出发，采用不同粒度分布和形状悬浮相技术、表面改性处理技术和添加剂技术等制备高性能磁流变液，已申报并获得众多专利。国外总体技术趋势为面向工程实际应用，从理论和实践探索影响磁流变液综合性能和耐久性的因素，从而获得高性能、低成本磁流变液。

在磁流变阻尼器件方面，自 20 世纪 90 年代以来，国外众多的研究者进行磁流变液减振器方面的研究，其中开始较早且最为成功的主要是美国。在磁流变液减振器的理论设计方面，美国马里兰大学代表了国际领先水平，他们研制出了带充气补偿结构的汽车磁流变液减振器。美国 Lord 公司于 1999 年研制的 180kN 磁

流变减振器采用三级螺线圈和双出杠型式，阻尼力值可达 180kN。为获得高阻尼力，日本 Sanwa Tekki 公司研制开发了最大输出力为 20 吨（1tf=9.8kN）的旁通阀式减振器，在主缸体外附加阻尼通道，由 10 阶缠绕线圈并联方式连接，大大提高了出力性能，并增加了活塞杆行程，而且由于旁通阻尼通道在减振器下方，有效遏制了磁流变液沉降问题带来的不利影响。为了保证磁流变减振器的密封性能，William A. Bullough 设计了一种海绵体多孔金属磁流变减振器。该减振器在活塞和缸筒之间的腔体中加设了由海绵、泡沫或纤维材料构成的蜂窝状空腔单元，同样可有效阻止磁流变液的沉降问题，并在一定程度上防止磁流变液的泄漏。内华达大学机械系的复合智能材料实验室研究员和 CSA 工程公司的技术人员共同成功地研制出军用高机动性多用途轮式车用磁流变液减振器。该减振器由减振器本体、储能器及电源组成，阻尼力调节范围可以满足部队车辆的使用（f=2Hz，A=±25mm，正弦波振动下，减振器的阻尼力可调范围为 480 ～ 2 100N）。

2.2.2 电磁流变材料应用潜力预测

磁流变材料（磁流变液、磁流变弹性体、磁流变胶等）的悬浮相主要由微米级和纳米级软磁金属或金属氧化物粉体构成，如羰基铁粉、镍粉、铁钴合金粉、氧化铁粉和不锈钢粉等。其中羰基铁粉由热解法制备，纳米氧化铁粉通常由化学共沉淀法制备或利用钢厂的废弃粉尘或氧化鳞皮，以便有效节约资源。目前也有研究表明，石墨烯将成为电磁流变材料制备的一种理想材料。

1. 磁流变智能振动控制

磁流变阻尼半主动控制能够取得与主动控制相当的控制效果，却不需要大量的能源输入，在很长一段时间内是结构振动控制研究的热点。磁流变振动控制技术可明显改善汽车的平顺性（乘坐舒适性）和安全性（操纵稳定性），降低驾乘人员和车辆的疲劳损伤，目前已成功开发的磁流变阻尼器、悬置、离合器、刹车器等在高档轿车、高级赛车、越野车、重型载货汽车、高速机车、轻中型战术车辆、医用救护车和火炮阻尼等方面有广阔的市场。另外，在船舶减振降噪、飞行器发射平台的振动控制、人车一体空投着陆缓冲装置、机器人技术、自适应飞行员座椅和飞机起落架等方面也在不断深入地研究。

为了提高乘坐舒适性，降低噪声水平和提高汽车的整体品质，高性能的发动机悬置变成了一个很热的研究课题。一种基于磁流变挤压模式的发动机悬置，它的等效阻尼是激励频率、振幅、初始间隙和电流强度的函数。通过控制磁场系统中的电流强度，可以在一定范围内调节这种悬置的动态刚度。与传统的橡胶悬置

相比，能更加容易地兼顾发动机的低频减振和高频隔振，从而提高车辆的舒适性，降低车内噪声水平，进而提高整车的性能。

随着国内外高速铁路技术的发展，国内旅客列车的运行速度不断提高，新建高速铁路列车车速已达到 300km/h 以上。随着列车速度的提高，轮/轨间作用不断加剧，车辆运动稳定性、运行平稳性以及安全性能受到了严重威胁。如何在高速运行环境下有效抑制车体振动，减小蛇行运动幅值，提高乘客的乘坐舒适性，增加安全裕量是一项重要的研究内容。高速动车组技术是近年来发展最为迅速的前沿技术之一，在高速动车组中采用时滞较小的磁流变阻尼器和恰当的半主动控制策略可以明显提高系统的平稳性与安全性。

2. 磁流变智能抛光

精密光学器件智能机械抛光是磁流变材料实际应用的另一个重要领域，它使传统的精密光学器件机械加工工艺发生了革命性变化。磁流变抛光技术原理是：在计算机控制的磁场下使磁流变体呈现不同的形状和刚度，一定粒度的磨料通过悬浮相成链后链间间隙的毛细力作用浮于表面，形成小磨头或缎带，从而实现对精密非球面光学器件的精密智能抛光，还可用于电子工业集成电路陶瓷和金属基片的精密研磨。随着现代光学系统对成像质量要求的提高，越来越多的非球面被采用，而且对光学零件的形状精度和表面粗糙度的要求也越来越高。由于非球面曲率变化的影响，光学零件偏离球面越多就越难加工，小磨头确定性抛光是目前加工非球面较可行的方法。美国磁流变智能抛光技术已进入实用化阶段，所用水基磁流变液具有良好的流动性和抗氧化性及稳定性，磁流变液智能抛光机和水基磁流变液已商品化，但售价昂贵。开展该项研究的有美国 MPM、QED Tech 等公司。

3. 在其他领域的应用研究

近年来，电磁流变材料的应用研究已在机器人、生物医学、靶向药物等领域展开，如智能化人工肌肉与触觉器件、细胞磁加热、细胞成像与分离、微流控芯片、原油管道的流动控制、油气开采防爆技术、热导率控制和能量收集等。

2.3 主要国家电磁流变材料发展状况

2.3.1 美国

美国的磁流变技术研究开发主要集中在马里兰大学、弗吉尼亚大学、内华达大学、宾夕法尼亚大学、Temple 大学、威斯康星大学、CSA Eng. 公司、Lord 公司、

Ford 公司、Delphi 公司、GM 公司、MPM、QED Tech. 公司和 Sandia 国家实验室等大学和企业及研究机构。从资源特点看，磁流变材料资源大都采用羰基铁粉作为悬浮相。从降低今后规模化生产的成本考虑，也在努力寻求廉价的悬浮相材料，如钢铁企业的废气粉尘和废渣、钢铁材料的车屑以及非羰基铁粉等。从目前磁流变技术应用的商业化程度看，美国处于高度领先的地位，主要专利集中在美国，具有技术转化的明显优势，如上述的汽车、军用装备方面的优势。另一显著特点或优势是美国率先提出磁流变液及阻尼器耐久性的参数，这一可靠性指标对实际工程应用的商业化十分重要。总体发展趋势是面向磁流变技术的实际工程应用，不断提高磁流变液及器件的功能特性、稳定性并降低成本，同时，更加注重磁流变振动控制系统的可靠性及其他环节的研究和工程化，如耐久性、控制单元等。如上所述，美国在此方面处于技术领先和市场垄断地位，主要战略目标为高档汽车、军用装备、重要的土木工程等方面的智能振（震）动控制和高端器件的智能抛光。

2.3.2 韩国、日本等

韩国电磁流变技术研究始于 1991 年，仁荷大学等开展了从电磁流变材料到器件的较为广泛的深入研究，包括汽车、轨道车辆等磁流变悬架系统及冲击缓冲装置。当初一些韩国大的化工企业和机械企业曾计划分别开发高性能电磁流变液和新型减振器及系统，但这种愿望在韩国工业追求发展速度的方针下难以实现。然而，一些小型企业却锲而不舍，持续发展这项技术。已有一个小企业生产不同于 Lord 公司的高性能磁流变液，一个制造汽车零件和系统的企业正在发展车用磁流变阻尼器，其结构结合了被动油压阻尼器和商用磁流变阻尼器的特点。韩国政府管辖的韩国铁道研究院正在发展一种用于高速机车减振和提高操作稳定性的特种磁流变阻尼器。韩国船舶重工正在发展一种新型磁流变悬置系统，用来控制发动机不同方向的振动，如垂直、横向和摇摆振动。韩国学术界中的很多团队正在进行电磁流变工程技术问题研究，其中一个聚合物领域的团队研制了不同组配的高性能电磁流变液，采用石墨烯制备成壳核结构悬浮相，提高了电流变效应、分散性和抗沉降性。来自机械工程领域的团队正在研制不同的电磁流变器件，如触觉器件、速度控制器件、振动控制器件等。日本的磁性液体技术有很强的优势，但在电磁流变液体及应用技术方面起步较晚。目前日本东北大学等在高性能磁流变材料方面进行了有特色的系统研究。另外，印度也较早开展了磁流变液技术研究工作。

2.3.3 德国、英国、法国

德国马克斯普朗克研究所、弗劳恩霍夫研究所、Thyssenkrupp 公司、BASF 公司等开展了从磁流变材料到器件的深入研究，磁流变悬浮相材料已形成一定的产业规模，在纳米磁性液体分散介质研究方面具有较强的优势。英国谢菲尔德大学在抗冲击磁流变阻尼器等方面进行了较深入的研究。法国尼斯大学在磁流变材料的性能与物理机制方面进行了系统的理论和实验研究。

第 3 章　我国电磁流变材料科技与产业发展现状

3.1　我国电磁流变材料科技与产业规模

我国国家自然科学基金、“863”“973”计划、国家科技支撑计划等曾先后资助部分大学和研究机构开展电磁流变液及其应用技术的研究工作，在电磁流变材料基础理论、材料制备和应用技术研究方面取得了很大进展，在国际电磁流变技术研究方面有一定地位，但在商业化进程方面与美国存在较大差距。

中国科技大学在国内率先进行磁流变液的理论研究。重庆仪表材料研究所等单位研制的磁流变液主要技术指标已接近国外产品水平，目前已形成 2 000L/a 高性能磁流变液的中试能力，较广泛地用于国内磁流变应用技术研究，已制定磁流变液材料的行业标准。重庆大学、西安交大等单位率先研制出汽车悬架磁流变智能减振器，并通过 200 万振动台架试验和道路试验，具有理想的振动控制效果，已发表多篇研究论文，获多项发明专利授权，形成了研发平台。有关高校和企业对军用装备智能振动控制的研究也不断深入，如装甲车辆转向装置、火炮防后坐阻尼、飞机起落架阻尼、船舶振动控制等。哈尔滨工业大学率先进行土木工程磁流变振动控制研究，成果已用于黄河滨州大桥等工程。另外，一些小型民营高技术企业如武汉盘古、宁波杉工、长春孔辉等公司在面向车辆和土木工程磁流变减振（震）方面取得了很好的进展。

经过数年的努力，我国自主研发的磁流变智能抛光技术已用于国家重大科学工程“神光”装置的重要部件加工，已研制出大口径抛光轮装置系统，具备 2m 光学零件的制造能力。尽管我国在磁流变液及智能减振控制和智能抛光技术研究方面取得了很大进展，但在电磁流变技术商业化应用方面与美国存在较大差距。

值得一提的是，中国京西重工集团（BWI）通过整体收购美国德尔福底盘系统公司，成功地消化吸收了国际领先的 MRC 主动式电磁悬挂技术，成为世界最大的主动式电磁悬挂供应商。当前，2015 款凯迪拉克 XTS 上搭载的第三代 MRC 就是来自京西重工的产品。

3.2 我国电磁流变材料技术与应用现状

3.2.1 高性能磁流变液制备技术

面向重要领域工程应用，已较好地解决了高性能磁流变液材料的制备技术问题。通过悬浮相化学表面改性及添加剂等技术，提高磁流变液的功能特性、稳定性和耐久性。探索磁流变液的边界润滑机理，建立流变学性能与边界润滑特性的相互关系，为磁流变技术在航空、航天、兵器装备及民用工业领域的应用提供支撑。目前我国磁流变液已达到的技术水平为零场粘度 $\eta_0 \leqslant 1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$，剪切应力 $\tau \geqslant 50\text{kPa}$（$B = 0.5\text{T}$），使用温度范围为 -40 ～ 150℃，抗沉降团聚稳定性达到三个月静置分层不大于 20% 且无板结、易再分散，使用耐久性为阻尼器经 2×10^6 次振动后无明显稠化和性能退化。

1. 悬浮相制备技术

（1）热解法制备羰基铁粉及性能、原理、工艺　元素周期表中某些过渡族元素能与一氧化碳反应生成羰基化合物，经热分解可获得高纯度、细粒度、活性大等性能独特的羰基粉末。羰基铁粉颗粒的结构特点带来的优异磁性使其成为理想的磁介质材料。该工艺流程复杂，技术难度和投入大，早期仅德国（BASF）、美国（GAF）、苏联等少数国家掌握该工艺，国内约在 20 世纪末才具备一定规模的羰基铁粉生产能力。羰基铁粉制取主要包括高压合成和热分解制粉两大工序。高压合成与热分解为可逆反应，合成反应在 20 ～ 30MPa、150 ～ 200℃下进行，分解反应在 190 ～ 300℃下进行。

$$\text{Fe} + 5\text{CO} = \text{Fe(CO)}_5$$

分解反应属吸热反应，其周而复始的过程形成了呈葱头状球型结构铁粉，粒度愈大，葱层愈多，羰基铁粉的电镜照片证明了该结构的存在。较高的热解温度和较大的气体流量是获得平均粒度较小羰基铁粉的必要条件。羰基铁粉中 C、N、O 成分与工艺条件有密切关系，若在生产过程中不附加任何气体，则获得的铁粉中 C 和 O 含量较高。若加入少量 N_2 作为载气，则 N 含量有所增加。实验证明，

加入 NH_3 气体生产的平均粒度在 3 μm 以上羰基铁粉性能为：氢损值不大于 0.4%，碳含量不大于 0.8%，而氮含量明显增高。

羰基铁粉的热处理及绝缘处理：对特殊要求羰基铁粉，则将上述分解所得到的原始羰基铁粉在氢气氛下进行还原热处理，以降低 C、N、O 含量。绝缘处理为采用磷酸盐或硅酸盐对羰基铁粉进行磷化和硅化处理，具有抗氧化、绝缘、减摩功能，可提高压制磁芯的高频性能。羰基铁粉主要掺和物为 Fe_3C、Fe_4N、Fe_3O_4，其次为游离 C、N、O 和某些吸附气体（CO、CO_2、NH_3 等），其中 CO 占绝对优势。上述掺和物中 Fe_3C、C、O 影响粉末磁性能，会降低粉末磁导率，可通过在一定温度状态下的还原气氛中热处理消除。羰基铁粉的脱碳速度与一定温度下热处理过程供给的氢气量有关，与粉末粒度也有很大关系。经上述热处理后，羰基铁粉的化学成分、结构、形状、硬度及磁性能发生明显变化：C、O、N 等明显减少，硬度明显降低，形状由球型变为非规则形状，葱头结构破坏，初始磁导率和磁损均明显增加。

羰基铁粉的电磁性能主要为相对品质因数 Q_{OH}，有效磁导率 μ，损耗系数 δ_r、δ_u、δ_g 和磁导率温度系数 $TK_{\mu H}$。羰基铁粉粒度对电磁性能影响：如果粉末粒度从 0.1 ～ 1 μm 增大到 8 ～ 10 μm，粉末松装密度将增大几倍，从而使高频铁磁体的磁导率提高。但增大粉末粒度会大大增加涡流频率损耗 δ_u，部分提高磁滞损耗 δ_r 及增高初始磁导率温度系数。超细粉末或纤维状粉末具有低的磁导率温度系数 $TK_{\mu H}$。羰基铁粉结构对电磁性能影响：羰基法生产的铁粉颗粒为具有内部独特“葱头”结构的球形颗粒，该结构决定了其具有很高的电磁性能。羰基铁粉颗粒葱头结构中同心层数越多，粉末的电磁性能越好。羰基铁粉在氢气中还原处理后，由于其葱头结构受到破坏，初始磁导率提高近两倍，δ_r、δ_u 提高 10 ～ 15 倍。羰基铁粉化学成分对电磁性能影响：电磁性能首先决定于粉末颗粒中单一同心层的原子－晶体结构。电磁参数值高的铁粉中都含有氮、碳和氧的化合物。当碳：氮≈ 1 时羰基铁粉的电磁参数最佳。

（2）羰基铁粉表面改性处理 化学镀镍：羰基铁粉在磁流变液中（特别在水基磁流变液中）氧化降低了磁流变液的剪切应力值，原因是氧化铁的饱和磁化强度低于纯铁的饱和磁化强度。镍磷镀层可提高抗氧化性，还可提高羰基铁粉表面的润滑性能和表面硬度，从而提高磁流变液的使用耐久性，同时金属镍本身也是铁磁性物质。化学镀镍工艺过程应避免粉体之间的粘接。

表面氮化：悬浮相铁粉颗粒硬度较低，在磁流变液工作过程中易发生磨损，铁粉又容易氧化，会使颗粒磁性能恶化。磨损和氧化都会使磁流变液性能发生劣化，影响磁流变液的正常使用和耐久性。通过气体氮化技术在悬浮相颗粒表面生成具有较高硬度和抗氧化性能的氮化层，可提高悬浮相的抗磨损、抗腐蚀性能，在不降低悬浮相磁性能的情况下增加了悬浮相的稳定性。同时氮化处理后还可降低摩擦系数，提高抗咬合性能。

（3）化学共沉淀法制备纳米 Fe_3O_4 粉体　Fe_3O_4 粉体用于制备高性能磁流变液的复合悬浮相。Fe_3O_4 属于反尖晶石结构，近年来的磁学性质研究表明，当 Fe_3O_4 磁性颗粒的粒径在 5 ～ 100nm 时，具有超顺磁性。纳米 Fe_3O_4 的制备方法主要有化学共沉淀法、水热法、溶胶凝胶法等。其中化学共沉淀法因为方法简单，设备成本较低，利于批量制备。

原理与实验方法。化学共沉淀法制备纳米磁性 Fe_3O_4 的反应式如下：

$$Fe^{2+} + 2Fe^{3+} + 8OH^- = Fe_3O_4 + 4H_2O$$

该反应的理论摩尔比为 Fe^{2+} ： Fe^{3+} ： OH^- = 1 ： 2 ： 8，但由于二价铁离子易氧化成三价铁离子，所以实际反应中二价铁离子应适当过量。化学共沉淀法制备超微颗粒的过程是溶液中形成胶体颗粒的凝聚过程，可分为形核和长大两个阶段。因此，控制合适的反应速度是成功制备纳米磁性 Fe_3O_4 的关键因素之一。

结构与性能。从制备的纳米 Fe_3O_4 粉体磁化曲线看，样品的剩磁基本为零，具有超顺磁性。比饱和磁化强度为 81.5emu/g，较块体四氧化三铁的比饱和磁化强度（90emu/g）低。所制备纳米 Fe_3O_4 的粒度分布在 20 ～ 50nm 之间，平均粒径为 30nm，粒径分布范围较窄。样品的 DSC 曲线在 676℃有一个较为明显的吸热峰，对应 TG 曲线上重量变化不明显，是相变所致。从纳米 Fe_3O_4 样品的等电位点图测得样品的等电位点为 6.5。由非胶体单质羰基铁粉和胶体 Fe_3O_4 悬浮相配制的水基磁流变液的抗氧化性和抗团聚性能明显优于单质羰基铁粉悬浮相磁流变液。

2. 磁流变液载液技术研究

载液油是确定磁流变液的温度稳定性和摩擦学特性的重要基础，一般要求具有高粘度指数、低黏度、低倾点和高闪点。面向磁流变阻尼技术应用，选择的载液油还应具有减振器油的特性要求，如优异的空气释放特性，突出的泡沫稳定性，良好的耐磨性和热稳定性以及优异的橡胶相容性。对一般矿物油而言，同时具备

高粘度指数、低粘度、低倾点和高闪点性能难度很大，即使通过加氢精制的基础油也很难达到该要求。首先，石蜡基矿物油基础油的倾点一般为 -15 ～ -9℃，很难满足冬季寒区要求；其次，矿物油的氧化温度低于合成基础油，所以高温使用时寿命短，且易形成氧化产物。与矿物油相比，某些合成基础油粘度指数高，倾点低，挥发度低，热安定性好，热分解温度高，特别适合作减振器油基础油。常用于减振器油调制的合成基础油主要是聚 α - 烯烃（PAO）、烷基苯、硅油。硅油是合成油中具有最好粘温特性的基础油，在宽温度范围内黏度变化很小可以制备成很高粘度指数、低温性能优异、具有较高热氧化安定性的油品，螺旋形的分子结构使得硅油具有非常高的压缩率，广泛用作减振液和阻尼液，是部分厂家作为减振器油基础油的首选。但是硅油的最大不足是与矿物油、合成烃、酯类油不相容，其次是在边界润滑条件下，润滑性能和承载能力差。聚 α - 烯烃是长链烷烃，与同黏度矿物油相比，具有较好的粘温特性、较高的闪点和较低的挥发性。另外，聚 α - 烯烃牵引力系数较低，有利于节约减振器的工作动力。聚 α - 烯烃的缺点是，会使某些橡胶轻微收缩和变硬。一般使用聚 α - 烯烃作为润滑油时加入部分酯类油，以改善对橡胶的膨胀性。

3. 磁流变液添加剂技术

磁流变液添加剂技术用于解决磁流变液的系列稳定性问题，是影响磁流变液性能的重要因素。磁流变液稳定性包括磁流变液抗沉降稳定性、抗团聚稳定性、温度稳定性及使用耐久性。零场下的抗沉降团聚稳定性是研究者关注的焦点。

（1）磁流变液的抗沉降稳定性　磁流变液中羰基铁粉粒径范围为微米级且密度远大于载液油或水，静置过程在重力场的作用下很容易发生沉降。该沉降促使悬浮相颗粒结成糕状甚至板结，从而丧失流动性和磁流变效应。颗粒在重力场中的空间分布将处于重力与浮力、扩散力的动态平衡之中。重力场中胶体溶液中颗粒浓度梯度与粒径有关，颗粒直径越小，流体浓度梯度就越低，这也是采用羰基铁粉加纳米 Fe_3O_4 粉作为复合悬浮相提高抗沉降性的原因之一。球形羰基铁粉颗粒在重力作用下沉降符合斯托克斯（Stokes）公式，即沉降速度与颗粒直径和两相的密度差成正比，与载液的黏度成反比。因此，为了降低颗粒的沉降速度，一般应减小固相颗粒粒径，增大载液的黏度。然而，磁流变液的分散性能、磁性能和力学性能决定于悬浮相颗粒的尺寸。综合考虑各方面的因素，颗粒都必须有一定的临界尺寸。其次，载液的黏度也不能随意增大，否则会增加颗粒在磁场下形

成有序结构时的阻力，增加器件的响应时间。借鉴相似的涂料工业、石油钻井的泥浆处理中采用的凝胶结构或触变结构技术，如在非极性分散体中加入膨润土或二氧化硅等触变剂，在氢键作用下形成疏松且不稳定的凝胶结构，其空间网格将大量溶剂分子和悬浮相包裹在其中，体系黏度明显提高，可有效防止悬浮相沉降和团聚。当受到外力作用时凝胶结构破坏，体系恢复原有的流动性，悬浮相可自由地在磁场作用下迁移成链。

（2）磁流变液的抗团聚稳定性　磁流变液的悬浮相为微米级、亚微米及纳米级颗粒，具有较大的比表面，易发生团聚失效。零场下悬浮相在液相中的团聚主要来自于颗粒间的范德瓦尔斯力和颗粒剩磁引起的磁力。可根据胶体稳定性的DLVO 理论在极性载液分散体中质点上引入双电层，形成颗粒间的静电排斥力；或通过高分子聚合物添加剂在非极性载液中质点上形成空间位阻，克服上述吸引力，提高磁流变液分散稳定性，高分子的稳定作用主要源于质点表面吸附高分子化合物后的空间位阻作用。

（3）磁流变液温度稳定性　磁流变液的温度稳定性包括温度使用范围和高、低温循环后性能稳定性。就悬浮相羰基铁粉和 Fe_3O_4 粉的固有磁性能而言，其居里温度分别为 770℃和 585℃，可不考虑磁流变液使用温度的影响。然而，若磁流变液长期在较高温度服役，羰基铁粉易发生氧化而形成表面氧化物，造成原有磁化强度降低，会使磁流变液的磁流变效应下降。制备磁流变液的基液和添加剂的使用温度一般在 -80 ～ 200℃之间，对磁流变液的温度稳定性影响较大。因此，提高磁流变液的添加剂、载液的温度稳定性、高温配伍性和悬浮相羰基铁粉的抗氧化能力是提高温度稳定性的关键。

（4）磁流变液的使用耐久性　磁流变液的综合性能是当今国际上衡量磁流变液技术水平的重要标志。耐久性和可靠性备受关注，对影响流变学特性以及耐久性因素的研究也在不断深入。提高磁流变液耐久性的途径除了前述的抗沉降、抗团聚稳定性等外，还应从抗使用稠化性能、抗密封失效性能、剪切应力稳定性方面改进和提高。使用稠化来自高剪力下羰基铁粉变形与表面化合物磨屑（纳米级）引起零场粘度不可逆升高和抗沉降性变化，通过羰基铁粉表面改性处理提高抗氧化、抗磨损性能，提高载液润滑性和耐腐蚀性的措施可有效提高磁流变液抗使用稠化性能。密封失效的重要原因是载液及添加剂使密封材料老化，选择与密封材料化学相容性好的载液及添加剂，并适当加入抗老化添加剂可有效改善密封性能。

羰基铁粉表面氧化导致磁化强度降低，造成磁流变液长期使用后剪切应力的衰减，提高羰基铁粉抗氧化性的表面氮化等表面改性方法行之有效。

4. 磁流变液的分散工艺

采用球磨工艺进行磁流变液的分散，主要设备为行星式球磨机。工艺路线一般为主料配料—混料—高速机械分散—超声分散—配辅料—球磨—高温处理—真空除气—性能初测。球磨速度和球磨时间根据分散剂的种类和配入量调整，在分散剂配入量较大时，球磨效果倍增，球磨时间应减少，否则，球磨后粒度明显减小，造成磁流变液零场粘度过高，磁流变效应下降。磁流变液的高温处理是为了使触变剂充分膨化并去除分散体中的吸附水，使性能更加稳定。

5. 磁流变液的性能及评价方法

采用旋转粘度计在一定剪切速率下进行零场流变性能测试，平板式磁流变性能测试仪测试磁场下剪切应力，磁通密度为 0.1 ～ 0.6T，剪切速率为 50 ～ 400/s。用振动磁强计测量磁流变液的饱和磁化强度、剩磁、矫顽力、初始磁化率。用 MMW-1P 型多功能摩擦磨损试验机、MQ-800 型四球摩擦试验机等进行摩擦学性能检测，按相关标准试验条件进行。采用自然沉降和目测的方法评价抗沉降稳定性，按沉降层的松软程度或静置后再分散性评价抗团聚稳定性，并通过减振器器件长期静置后恢复特性验证。耐久性试验采用磁流变减振器的台架或车辆道路寿命试验进行，记录台架无故障试验次数或路试里程数，并进行不同阶段的示功特性测试，与原始值比较确定变化情况。

（1）磁学性能　典型磁流变液样品的饱和磁化强度约为 380kA/m。块状纯 Fe 的饱和磁化强度为 1 707kA/m，所采用的羰基 Fe 粉的饱和磁化强度略低于上述块状纯 Fe 值，可见磁流变液的饱和磁化强度 $M \approx \varphi M_s$，式中 φ 为磁流变液悬浮相的体积分数，M_s 为悬浮相材料的饱和磁化强度。在磁化曲线上无磁滞现象发生，其剩磁、矫顽力基本为零。初始相对磁导率约为 3.2，与国外报道值相当。

（2）流变学性能　典型磁流变液样品的室温零场粘度 η_0 为 0.9 ～ 1.1Pa·s（$\gamma = 10/s$），在 0.5T 磁通密度下的剪切应力 τ 大于 50kPa。η_0、τ 与体积分数成比例关系。

（3）抗沉降团聚稳定性　对典型磁流变液的长期抗沉降、抗团聚稳定性观测结果为静置三个月分层不大于 20%，且松软和易再分散，具有良好的长期抗沉降、

团聚稳定性。

（4）摩擦学特性 典型样品的摩擦系数测值为 0.098，磨痕直径为 0.441mm；长磨摩擦系数为 0.097，磨痕直径为 0.636mm；最大无卡咬负荷为 294N，烧结负荷为 1 569N 。

（5）耐久性 通过磁流变减振器的 200 万次示功机台架试验和实车 6 000km 道路试验，试验后磁流变液性能无明显变化。

6. 磁流变液的应用实验情况

西安交通大学强度与振动教育部重点实验室将上述磁流变液用于特种车辆自适应减振系统的研发，进行了行程近 6 000km 的路面验证试验，测试表明系统减振效果显著。通过使用前后的磁流变阻尼器性能测试，阻尼器性能稳定，表明所用磁流变液性能具有高稳定性。南京理工大学机械工程学院将上述磁流变液用于火炮反后坐装置的磁流变液阻尼器，台架试验和沙弹射击试验的阻尼力测试值与理论设计值基本相等。随着时间推移和使用次数的增加，阻尼力值稳定，性能良好，满足使用要求。哈尔滨工业大学机电工程学院将上述磁流变液用于模拟实验卫星整星隔振用磁流变液阻尼器研究，采用 LQR 控制算法对整星隔振系统进行半主动控制实验，取得比较理想的结果，所用磁流变液性能良好。北京理工大学信息科学技术学院 将上述磁流变液用于磁流变智能抛光装置，对 K9 玻璃试样进行抛光试验，最大去除率 12 μm/min，最佳粗糙度 2.1nm，材料去除率高，试件表面粗糙度明显改善。长安汽车（集团）有限公司将上述磁流变液用于研发的磁流变减振器，并与美国 Lord 公司的磁流变液（MRF-336AG）进行对比试验。在同等激励频率、同等激励电流下，两种磁流变液的响应特性和力学特性基本相同，零场流变性能优于 Lord 公司的磁流变液。重庆大江工业集团有限公司将上述磁流变液用于某特种车辆磁流变智能主动油气悬架系统，经 1 500km 的道路行驶试验（含高速良好路面及崎岖越野路面），表现出良好的悬架减振性和电控性能。铁马集团等用上述磁流变液研制成功特种车辆智能悬架系统，获得良好的减振性能和稳定性。中国矿业大学、徐州五洋科技有限公司用上述磁流变液研制成功一种高功率多盘式磁流变离合器，最大输出力矩 1 545N·m，具有稳定的高达 35kW 的转差功率，可用于较多大功率场合。

3.2.2 磁流变智能减振技术

1. 磁流变液阻尼器设计、制造

（1）设计理论与模型 针对汽车主悬架的技术要求，基于混合工作模式的环状阻尼通道汽车磁流变液阻尼器设计原理和非牛顿流体力学理论，建立了磁流变液在阻尼通道准稳态流动方程，得出了流动的边界条件、协调条件和准稳态流动特性。依据磁路设计理论和磁流变液阻尼器对阻尼器通道磁场的要求，选择低碳钢作为磁路的铁心，用实验方法得出了铁心和磁流变液的磁化特性，建立了磁流变液阻尼器的磁路方程，导出了励磁电流与阻尼通道磁感应强度之间的关系和阻尼力的计算方法，揭示了磁流变液阻尼器的阻尼通道结构参数和磁路参数对阻尼器的阻尼力影响，完成了磁流变液阻尼器的速度特性和示功特性仿真计算。按照轨道车辆悬挂系统抗蛇形振动的技术要求，提出了基于多级径向流动模式的磁流变液阻尼器设计原理，建立了磁流变液在径向阻尼通道准稳态流动方程及流动的滑移边界条件、协调条件、准稳态流动特性。

（2）结构设计 磁流变液阻尼器工作过程中，活塞杆不断地往复运动，使缸筒内容纳磁流变液的体积发生变化，将磁流变液看作不可压缩流体，就需要在阻尼器内设计补偿装置，用以容纳活塞杆进入缸筒时排开的磁流变液，在活塞离开缸筒时回到缸筒中，以避免缸筒内出现真空。借鉴现有汽车减振器的补偿方式，采用双筒结构设计了磁流变液阻尼器的补偿装置，补偿器包括补偿阀、补偿器壳体、补偿气囊，采用橡胶波纹压缩气囊实现磁流变液阻尼器体积补偿。磁流变液通过专用补偿阀内部小孔由工作缸下腔向补偿器壳内流动，此时流动阻力大，磁流变液充分填充工作缸上腔。气囊的推动作用有利于磁流变液的二次起浮，在一定程度上可以防止磁流变体的沉降。

（3）磁场发生器设计 磁场有限元分析有效解决了磁流变液阻尼器磁路设计问题，准确地预测了磁流变液阻尼器的力值随电流的增长关系以及磁流变液阻尼器的磁路饱和现象。运用磁路有限元分析，双级激励磁流变液阻尼器的有效工作磁感应强度从 0.3T 提高到 0.5T 以上，将阻尼器的最大力值由 1 200N 左右提高到 1 800N 以上。按照多级径向流动模式磁流变液阻尼器的工作原理，设计了一种基于径向流动模式的磁流变液阻尼器，磁场发生器的励磁线圈在阻尼调节装置的缸筒上周向绕制，励磁线圈产生的磁场在阻尼通道磁路中磁通沿轴向分布，缸筒采用非导磁材料使磁通集中到阻尼通道磁路中。当励磁电流为零时，阻尼通道中

的磁流变液未受磁场影响，流动特性好，减振器的阻尼力小。当电流通过励磁线圈时，阻尼通道受到磁场影响，磁流变液的流动特性发生变化，流动阻力增大，阻尼器的阻尼力增大。

（4）密封技术研究　将原有的汽车减振器油改为磁流变液后，研究其密封能否满足要求就显得非常迫切，磁流变液与减振器的橡胶密封圈的相容性也需要试验验证。另外，由于磁流变液阻尼器需要从内部引出导线，导线引出部位的密封至关重要。试验表明，在高温和机械作用下，丁腈橡胶与磁流变液之间不会发生化学作用并有良好的耐磨性，因此磁流变液阻尼器的活塞杆密封材料采用丁腈橡胶。设计了磁密封与机械密封相结合的复合密封装置，在密封装置设置永磁体和磁流变脂。下端设置两级橡胶唇口，起到机械密封磁流变液的作用，上端设置单级橡胶唇口，防止外部灰尘物。在活塞杆密封中采用了双导向环和三级磁性橡胶 Y 型密封，从而阻止磁流变液的渗漏，实现磁性密封，同时磁性橡胶 Y 型密封又可以实现机械密封。提出活塞杆表面微裂纹镀铬技术，严格控制裂纹的宽度和深度，使铁磁性颗粒不能夹持于裂纹中，同时微裂纹又具备储存磁流变液载液的能力，在活塞杆与橡胶唇口之间起到润滑作用，提高活塞杆表面的耐磨性。阻尼器缸筒与纯铁活塞表面采用了低真空渗碳技术，提高抗冲刷性。

（5）磁流变液阻尼器制造　以马自达轿车为基础研制出汽车磁流变液阻尼器的全部零部件，并进行了阻尼器的组装调试。根据轨道车辆悬挂抗蛇形振动的技术要求，完成了基于多级径向流动模式的外置磁场发生器机车磁流变液阻尼器制造，工作油缸与磁场发生器之间采用高压油管连接，这种结构可以有效避免励磁线圈的密封问题，并且磁场利用率可以得到大幅提高，从而降低磁流变液阻尼器的功耗。试验表明，按照振幅 25mm，最高峰值速度 0.1m/s，正弦激励，在输入功率小于 50W 的条件下，磁流变液阻尼器的阻尼力调节范围可以达到 5 000 ～ 30 000N。现代运行 250km/h 的动车组抗蛇形振动的液力阻尼器的阻尼力为 10 000N 左右。

2. 磁流变液阻尼器特性

（1）示功特性与评价技术　为了全面了解汽车磁流变液阻尼器的工作特性，按照 QC/T 545—1999《汽车筒式减振器台架试验方法》和 QC/T 491—1999《汽车筒式减振器　尺寸系列及技术条件》，对磁流变液阻尼器的示功特性和速度特

性进行实验室测试。试验在电液伺服激振控制台（MTS8701）上进行，采用简谐振动，振幅为 ±25mm，最高速度为 0.1m/s、0.3m/s 和 0.6m/s，电流取值 0.0A、0.2A、0.6A、0.8A、1.0A、1.2A、1.4A 情况下，测试结果中示功曲线圆滑饱满，可控性好，0 ～ 1.4A 时最大阻尼比约 5 倍。

对轨道车辆抗蛇形磁流变液阻尼器的评价，参考动车 CRH1 的相关参数，按照 KONI04R-1722 抗蛇形阻尼器的要求进行。磁流变液阻尼器的试验工作在液压减振器试验台（J95-1）上进行，采用简谐振动，振幅为 ±25mm，最高速度为 0.01m/s、0.03m/s、0.05m/s 和 0.1m/s，电流取值 0.0A、0.1A、0.2A、0.3A、0.4A、0.5A、0.6A 情况下记录示功图。在高速情况下，同时还要求记录速度曲线（速度 0.1m/s 和电流 0A、0.6A 条件下）。试验表明，基于多级径向流动模型的磁流变液阻尼器的调节范围能满足机车抗蛇形振动的要求。

（2）耐久性试验　耐久性及可靠性是磁流变液阻尼器在悬架系统中应用不可回避的问题。参照国家标准规定的普通油液式阻尼器耐久性试验标准，开展了磁流变液阻尼器耐久性测试，采用减振器试验台对开发的汽车磁流变液阻尼器进行了耐久性试验，其中汽车磁流变液阻尼器按照最高速度 0.393m/s，振幅 ±25mm，采用风冷方式连续不停运行，累计循环次数为 200 万次，无技术故障，能满足汽车悬架减振器技术要求。参照国家标准规定的机车油液减振器次耐久性试验标准，开展了轨道车辆抗蛇形振动磁流变液阻尼器耐久性测试，采用机车液压减振器试验台对按照开发的轨道车辆磁流变液阻尼器进行了耐久性试验，按最高速度 0.1m/s，振幅 ±25mm，采用风冷方式，励磁电流 0.5A，白天运行晚上停机，试验近 200 天，运行达 350 万次，未发现阻尼器技术故障，前后示功试验特性变化小于 25%。

（3）静置恢复试验　由于磁流变液在长期静置的条件下不可避免地出现沉降问题，导致磁流变液阻尼器可控特性劣化，甚至出现不可控的状态，对磁流变液阻尼器静置后的恢复特性进行试验研究。采用机车液压减振器试验台，对新研制的磁流变液阻尼器进行示功特性检测，然后将磁流变液阻尼器静置 100 余天后进行相同的示功特性测试。试验表明磁流变液阻尼器在运行 3 ～ 5 个循环后可以恢复原来的阻尼特性。

（4）响应特性试验　磁流变液阻尼器动态响应时间直接决定其控制周期和使用效果，动态响应是在考虑磁流变液动态响应时间、励磁线圈以及活塞组成

的磁学组件的动态响应、控制器件以及电流源等电子器件的动态响应等之后的综合动态响应，该响应也受磁流变液阻尼器的励磁线圈连接方式、温度效应等的影响。利用 MTS 液力伺服系统对磁流变液阻尼器进行激励，激励方式采用三角波，激励速度为 0.3m/s，采用阶跃电流激励（0 ～ 0.5A 或者 0.5 ～ 0A），检测其阻尼力的变化特性。检测结果为阻尼力上升时间为 8.6ms，阻尼力下降时间为 21.5ms。

3.2.3 磁流变智能抛光技术

国内开展磁流变技术研究的单位有重庆仪表材料研究所、清华大学、北京理工大学、国防科技大学、长春光机所、哈尔滨工业大学、中国工程物理研究院等单位，这些单位分别开展了磁流变抛光液和智能抛光机械及工艺技术的研发，在大口径光学器件磁流变轮式抛光及小口径光学器件磁流变射流抛光方面明显缩小了与美国的技术差距。基于可控粘度磁流变抛光方法及其装备，已研制出适应超大口径空间光学元件加工的磁流变抛光工具，如大口径抛光轮装置系统，具备了 2m 光学零件的制造能力，较好地解决了空间光学镜面的低应力纳米精度高效抛光技术问题。

随着现代光学系统对成像质量要求的提高，越来越多的非球面被采用，对光学零件的形状精度和表面粗糙度的要求也越来越高。小磨头确定性抛光是目前加工非球面较可行的方法，但是对于高陡度非球面、大长径比内腔、小尺寸非球面光学零件等由于机械干涉和陡峭的局部倾斜度的限制，还没有有效的抛光方法。磁射流抛光技术结合了射流抛光技术和磁流变抛光技术的特点，是一种小磨头确定性抛光技术。该技术利用喷嘴出口附近的局部轴向磁场对磁流变液射流束产生集束稳定作用，保持束径在长距离内基本不变，形成稳定的细长射流束，大大提高了确定性抛光去除函数的稳定性，且由于射流束径较小，适应上述特殊非球面光学零件的修形和抛光加工。计算机控制磁射流抛光是先进光学制造技术的一项新构思，国内已从工艺、技术和原型系统平台建设三个方面对水射流体抛光方法展开深入系统的研究工作，解决了以下关键技术：复合动力泵供压结构一体化的射流工具的设计与开发，并实现实时响应，以及可变射流束直径的调节机构的设计，整个射流工具头结构精巧、控制灵活且其姿态调整功能与系统整体协调无干涉；亚毫米尺度微型射流斑准直性、束形性及抛光区域内磨粒场分布特性的准确控制；射流抛光理论模型与工艺模型的一致性和模型参数的收敛问题。具有以下

特点：①空间姿态控制能力突出，合成坐标系的射流工具头可最大限度地改善出射液柱的空间姿态，提高其轴向和横向补偿能力，避免了有限自由度控制技术同时改善轴向与横向补偿效果有限的问题。在适应多轨迹、多类型元件方面具有独特优势，已经形成具有自主知识产权的核心技术；②去除函数品质好，射流抛光技术显著改善了液柱的束流品质和响应特性的线性，同时使响应特性曲线绝对零位与去除函数的峰点位置一一对应，保证了峰点位置附近的线性最佳、寻址最准确，因而在保证柔性高质量抛光的同时，还可显著提高射流抛光系统的确定性去除能力；③工艺完备性及可复制性强，射流抛光机工艺技术先进，影响参数复杂，要进行后台集成式知识管理模糊算法建模，可进行离线式数据融合与分析，摆脱对工艺经验的过度依赖，提高开放度并简化操作，为突破光学加工设备“专机”限制，明确推进射流抛光机的产品化奠定基础。上述进展突破了非对称自由曲面元件磁射流制造的系列核心技术，研制成功了计算机控制光学非球面制造装备，实现了同 / 离轴光学非球面纳米精度的制造。喷嘴射流束径可调节范围：0.2mm、0.6mm、1mm、1.2mm、2mm、3mm。利用配制开发的抛光液体开展了磁射流抛光工艺实验，针对口径 100mm、相对参考面位相梯度 10.5λ/mm 的离轴非球面反射镜试件（K9 光学玻璃），抛光后表面粗糙度达到 0.5nm，面形精度达到 0.021 6λ（λ=632.8nm）。

3.2.4 国内相关企业情况

由重庆材料研究院和重庆大学联合研制的汽车磁流变液阻尼器具备以下性能：按照正常服役工况，磁流变液阻尼器件连续运行 200 万次，不发生技术故障，输出特性最大衰减小于 20% ～ 25%；磁流变液阻尼器静置三个月后，按照正常励磁与速度激励，运行 3 ～ 5 次循环，恢复正常的可控输出特性；按照机车服役工况在激励速度条件下，励磁电流上升和下降响应时间均不大于 25ms。

另外，国内武汉盘古减振抗震缓冲技术有限公司将磁流变技术成功地用于下列产品开发：抑制滚筒洗衣机振动游走、楼板振动的挤压磁流变减振器，军用大扭矩连续旋转式磁流变减振器，高速工程车用磁流变减振器，轮式装甲车用磁流变减振器 (油气弹簧) 系统，战地救护车用磁流变隔振 (油气弹簧) 系统，建筑结构用小型磁流变减振器，提速机车用磁流变减振器，装甲车叶片式磁流变减振器等。宁波杉工公司成功开发用于土木工程的磁流变液阻尼器和磁流变液，减震器的最大阻尼力可达 600N、5kN、10kN、20kN，硅油基磁流变液在 1T 磁场时剪切

应力为 55kPa，零场粘度为 240mPa·s，使用温度范围为 -40 ～ 180℃。长春孔辉汽车科技公司研发的泵式磁流变减振器具有响应速度快、阻尼调节范围大等特点，基本达到了国外同类产品的性能水平，磁流变阀减振器的响应速度和阻尼调节范围都要较电磁阀减振器优越，价格较泵式磁流变减振器低。浙江大学新剑（上海）智能技术研究院研发的系列磁流变液，具有较好抗沉降性，磁流变减振座椅、微型力反馈电机控制器、车辆转向控制器、汽车缓速器也都具有一定的特色。

京西重工有限公司（国企）于 2009 年 11 月正式收购美国德尔福公司全球减震和制动业务，一举进入世界级汽车零部件领先企业行列。原德尔福减震和制动两个业务团队也一并加入了京西重工。京西重工现有主要产品包括：磁流变减震器、主动式稳定杆、磁流变发动机悬置、被动式减震器、鼓式制动器、电子稳控系统等，其中磁流变减震器、主动稳定杆系统、电子稳定性控制系统、防抱死制动系统等产品技术处于世界一流水平。为充分发挥京西重工在北京的区位优势和在高端汽车零部件方面享有完全自主知识产权的优势，京西重工于 2010 年 2 月 20 日在房山投资兴建了房山减震器工厂。一期工程建设规模为 400 万支减振器，项目建设投资约 4.86 亿元，达产后实现年销售收入约 8 亿元。2011 年 1 月已成功生产出第一批合格样件供客户试装和检测，现已进入正式批量供货阶段。房山研发中心和总部大楼的建设也在筹备中，京西重工还将适时启动二期 400 万支减震器工厂和制动器工厂建设。京西重工经过 2010 年和 2011 年两年的正式运营，在市场开发、技术研发、ERP 项目建设、新项目建设、专业管理及企业文化和品牌建设等方面都取得了长足的发展，在稳定原有客户的基础上，公司实现了 9 家新增客户和 24 亿美元的新订单。2010 年实现销售收入 6.5 亿美元，2011 年实现销售收入 6.7 亿美元。京西重工的中长期目标是：通过核心技术和综合竞争能力的巩固、提升，整合国内外有效资源，扩大产业规模、增加市场份额，2015 年销售收入要达到 100 亿元以上，进入国内特大型汽车零部件企业第一集团行列（国内前十名），2020 年进入国内汽车零部件企业前三名，进入世界汽车零部件百强企业。

3.3 科技与产业发展存在的问题

如前所述，我国国家自然科学基金、“863”“973”计划、国家科技支撑计划、中小企业创新计划等国家层面计划和部分地方性科技计划曾先后资助部分大

学和研究机构及相关企业开展电磁流变材料及应用技术的研发工作，使得我国在电磁流变材料基础理论、材料制备和应用技术研究方面取得了很大进展，在国际上有了一定地位和影响力，一些高技术型小型民营企业在电磁流变技术商业化进程中扮演了重要角色，但在商业化进程方面与美国、韩国存在较大差距。

电磁流变技术研究近十年在国内得到了长足进展，与美国的技术差距明显缩小，资源可持续性也不存在问题。目前最大的问题是还没有形成磁流变技术及产品的商业化，有待通过产学研的紧密联合唤起企业的积极性或通过企业消化吸收引进技术的捷径及相关体制机制创新早日实现我国磁流变技术及产品的商业化。磁流变技术系面向高端重要装备制造的一项高新技术，需有一定的建设和生产成本，尚不适于在低端廉价装备应用。在体系管理建设方面，已培养了一定数量的磁流变技术中高级研发人员，建立了磁流变技术的材料研究、性能评价、器件研究、工程应用研究的专门人才队伍，形成了磁流变技术的研发平台，为后续发展打下了较好的基础。国内目前也具备了该方面的项目管理和市场开发人才。在政策保障方面，应通过相关政策鼓励和支持高技术型小型民营企业在电磁流变技术商业化进程中发挥探索和引领作用。

第 4 章　电磁流变材料科技与产业发展战略概述

美国电磁流变技术经近 20 年的发展已成功获得商业化应用，发挥了很好的引领作用。韩国电磁流变技术的工业化发展也走在了亚洲的前列。经过近十年的发展，我国的磁流变减振和磁流变抛光技术已具备较好的技术成熟度，已有一定数量成功的高端工程应用示范，国内一些小型高技术民营企业在商业化进程中走在了前列。电磁流变材料技术已列入国家“十二五”新材料产业发展规划智能材料部分，在高端装备制造领域有很好的发展潜力，市场前景清晰，投融资风险小。

目前我国磁流变液及应用科技优势领域为：汽车及特种车辆磁流变智能减振及传动技术、土木工程磁流变智能减震技术、精密光学器件磁流变智能抛光技术、火器防后坐磁流变智能阻尼技术等。另外，在舰船振动及噪声控制、高速机车抗

蛇形振动及磁流变摩擦学等方面也形成一定研究特色。重点工程分布主要为：高档轿车及特种车辆磁流变智能减振及传动技术，土木工程磁流变智能减震技术，精密光学器件磁流变智能抛光技术。

未来，电磁流变材料科技与产业的发展目标是：高性能磁流变液是磁流变智能减振和磁流变智能抛光的物质基础，可控制性能优异的磁流变液减振器和悬架控制系统，是实现汽车磁流变悬架的关键；面向重要领域工程应用，解决高性能磁流变液材料的批量制备技术问题，形成批量化生产；通过悬浮相的优化及添加剂等技术改进，不断提高磁流变液的功能特性、稳定性和耐久性；通过流动与磁路及结构优化，提高磁流变减振器的功能特性和使用寿命；通过非线性动力学模型建立、智能控制方法、系统可靠性优化，完善磁流变悬架控制系统；建立磁流变器件专业化、批量化生产线和质量保证体系，为磁流变技术在航空、航天、兵器装备及高端轿车等民用工业领域的应用提供支撑。

高档轿车磁流变智能减振及传动工程、军用车辆磁流变智能减振工程、拉索桥梁磁流变减震工程、精密光学器件磁流变智能抛光技术将率先实现商业化，目前已接近完成工程化技术实验阶段，其中部分技术已有示范工程。

我国目前的基础工业技术水平和能力能够满足电磁流变技术产业化对资源的需求，如国内的一些大型骨干化工企业及石化企业可提供磁流变液的悬浮相材料和试剂材料及部分介质材料，如系列羰基铁粉、纳米磁粉、工业基础油脂、化学助剂、密封件材料等。这些材料的技术水平已基本与国际接轨，其资源开发潜力和资源可持续性不构成影响。就技术条件而言，我国还应具备较高水准的企业技术研发和储备能力，以便适应市场不断变化所要求的持续创新，应拥有具备高效、务实、富有远见和开拓精神的管理队伍和技术团队，国内高校近年来已培养了一定数量的电磁流变技术的中高级人才。目前市场渠道开拓主要包括高档汽车、军用装备、精密仪器、精密加工机械等。

引入不同的体制和机制，如风险投资机制等，对实现我国磁流变技术商业化也十分重要，京西重工可谓本土发展的成功示范。京西重工为首钢总公司和房山国有资产管理公司投资创立的合资企业。2009 年 11 月，京西重工有限公司耗资 1 亿美元，整体收购前德尔福底盘部门，成为世界最大的 MRC 主动式电磁悬挂供应商。基于对德尔福资产的收购，京西重工目前生产包括制动器（防抱死系统、卡钳、刹车盘、转向节、角总成、刹车鼓、真空助力器和制动主缸）和悬架产品（传

统带支架的前后减、磁流变前后减、减震模块、磁流变动力总成悬置、空气悬架模块和高低调节系统、主动式稳控系统、防侧倾系统）。京西重工的悬架产品，特别是主动悬架系统，在行内得到高度评价。2015 款凯迪拉克 XTS 上搭载的第三代 MRC 就是来自京西重工的产品。京西重工的战略计划是，2015—2020 年减震产品的生产要增加 50%。2014 年京西重工将其欧洲地区的资产成功注入京西国际。这是京西重工在香港建立的上市公司，该公司也将作为 2015 年 9 月在捷克共和国海布市动工的汽车悬挂产品制造工厂的投资主体。

随着我国电磁流变技术由工程化向商业化的迈进及批量化生产技术的完善，国外产品的竞争优势会有所下降，而原有垄断价格的降低，也会造成国内价格优势的降低。这种情况可在批量生产后通过成本降低得以缓解。

在与上下游产业的协调发展模式方面，官、产、学、研联合模式有利于我国磁流变技术的发展，前期的发展重点在部分大学和研究院所，目前的重点工作是引导和调动企业的积极性，如汽车减振器厂和整车厂的积极性。磁流变技术的产业链为：上游产业的油料、化工助剂、磁性材料等行业，下游产业的减振器、汽车整车制造行业。要使上下游产业有机结合。人体健康和军事需求是美国磁流变技术发展的驱动因素，我国在此方面特别是前者的意识还有待提高，相信会随着我国社会发展而得到加强。

第 5 篇

生物功能材料

随着社会的发展，材料也随之发展。过去，人们对材料的理解仅包含金属材料与无机陶瓷材料。之后，随着人类活动领域的扩展，对于材料的要求越来越高，现在对材料的理解不仅包含金属、非金属，还包括高分子材料、复合材料以及新型仿生材料。功能高分子材料是 20 世纪 60 年代发展起来的，是高分子材料渗透到各个领域后涌现出的新材料。

生命科学和新材料科学被列为 21 世纪重点发展的领域，而生物材料学作为前沿性交叉学科，更是优先发展的重点。生物与材料有着密切的关系，神奇的大自然生物对于新型材料的设计起着极大的引导作用，如荷叶的自清洁作用，鲨鱼皮减少水中阻力的作用等生物现象都给予材料发展极大的启迪。可以说，生命科学研究已经渗透到各个学科和领域，成为解决问题的突破口，而多学科的融合成为科学技术发展的趋势。

生物功能材料的发展依赖于人们对生命现象或生命组织的物理、化学、生物特性的深入研究，它能帮助人们搞清生存与环境的关系，其在工业、农业、生物化工、医学研究甚至于国防建设等方面的应用，对高科技产业和国民经济的发展都将起到很大的促进作用。

第 1 章　生物功能材料概述

1.1　生物功能材料的特点及分类

生物功能材料主要是对生物材料本身所具有的物理、化学、生物功能加以开发利用而得到的一类新材料，泛指生物医用高分子，特别是某些天然高分子材料和合成高分子材料。

1.1.1　生物功能材料的特点

生物功能材料是主要以医疗为目的，用于与组织接触以形成功能的无生命材料，其广泛地用来取代或恢复那些受创伤和蜕化的组织或器官的功能。由于与人体的组织和器官接触，因此，与一般功能材料相比，生物功能材料具有如下特点：①在化学上是惰性的，不会因为与液体接触而发生反应；②不会引起人体组织炎

症或排异反应，不会致癌；③具有良好的血液相容性，不会在材料表面凝血；④长期植入体内，能够保持一定的机械强度；⑤若非永久性植入体内材料，要求在一定的时间内能被生物降解，且降解产物对身体无毒害，容易排出；⑥能经受必要的清洁消毒措施而不产生变形；⑦具有良好的加工成型性，易于加工成需要的复杂形状；⑧多功能性，如生物膜具有反应器、光电转换、信息交换、分离输送等多种功能。

1.1.2 生物功能材料的分类

生物功能材料按来源分主要有天然生物材料和合成高分子材料。天然生物材料是指从自然界现有的动、植物体中提取的天然活性高分子，如从各种甲壳类、昆虫类动物体中提取的甲壳质壳聚糖纤维，从海藻植物中提取的海藻酸盐，桑蚕体内分泌的蚕丝经再生制得的丝素纤维与丝素膜，以及由牛屈肌腱重新组构而成的骨胶原纤维等。合成高分子材料因与人体器官组织的天然高分子有着极其相似的化学结构和物理性能，因而可以植入人体，部分或全部取代有关器官。因此，在现代医学领域得到了最为广泛的应用，成为现代医学的重要支柱材料。目前，使用于人体植入产品的高分子合成材料包括聚酰胺、环氧树脂、聚乙烯、聚乙烯醇、聚乳酸、聚甲醛、聚甲基丙烯酸甲酯、聚四氟乙烯、聚醋酸乙烯酯、硅橡胶和硅凝胶等，应用场合涉及组织粘合、手术缝线、眼科材料（人工玻璃体、人工角膜和人工晶状体等）、软组织植入物（人工心脏、人工肾、人工肝等）和人工管形器（人工器官、食道）等。

生物功能材料按照性质分有非生物降解和可生物降解两大类。非生物降解的生物医用高分子包括聚乙烯、聚丙烯、聚丙烯酸酯、芳香聚酯、聚硅氧烷、聚甲醛等，其在生理环境中能长期保持稳定，不发生降解、交联或物理磨损等，并具有良好的力学性能。可生物降解的生物医用高分子材料则包括胶原、脂肪族聚酯、聚氨基酸、聚己内酯等，这些材料能在生理环境中发生结构性破坏，且降解产物能通过正常的新陈代谢被基体吸收或排出体外。非生物降解和可生物降解生物医用高分子材料在生物医学领域各有自己独特的发展地位。然而，随着生物医学和材料科学的发展，可生物降解生物医用高分子材料越来越得到人们的青睐。

生物功能材料按照功能分有生物电功能材料、生物光活性材料、生物磁功能材料、形状记忆生物功能材料、生物智能材料、仿生功能材料等。

1. 生物电功能材料

导电高分子材料是近年来发展较快的领域，自 1977 年第一个导电高分子聚

乙炔（PAC）发现以来，对导电聚合物的合成、结构、导电机理、性能、应用等方面有许多新认识，现已发展成为一门相对独立的学科。从导电机理的角度看，导电功能生物材料可分为结构型导电高分子和复合型导电高分子类，其主要应用于电化学和生物传感。目前研究较多的导电高分子有聚乙炔（PAC）、聚苯胺（PAN）、聚吡咯（PPY）、聚噻吩（PTP）、聚对苯撑（PPP）、聚苯基乙炔等。

复合型导电高分子是在普通聚合物中加入各种导电性填料制成的，这些导电性填料可以是银、镍、铝等金属的微细粉末，导电性炭黑，石墨及各种导电金属盐等。目前基于石墨烯构建的纳米复合材料在电化学生物传感器中的应用备受关注。石墨烯独特的电子结构特征和物理化学性质，使其在电化学检测和电分析等方面显示出独特的优势，可用于制备灵敏度高、选择性好、电流响应快、检测范围宽、检测限低的生物分析和环境检测电化学传感器。Chen 等人首次采用一种基于石墨烯和壳聚糖（CS）复合薄膜的新型生物相容性传感基质来固定血红蛋白（Hb），并研究 Hb 的直接电子转移和生物电催化活性。研究结果表明，石墨烯和壳聚糖复合材料为生物分子的固定提供了友好的生物相容性界面，并保持了这些生物分子的原始结构；复合薄膜中的石墨烯可以加速基质和 Hb 的电活性中心之间的电子转移。这种基于石墨烯和壳聚糖的方法为蛋白质的固定化和生物传感器的制备提供了一个极好的平台。Ju 等人用聚苯乙烯磺酸接枝聚吡咯（PSSA-g-PPY）将还原的氧化型石墨烯（RGO）功能化，将其用于构筑电催化生物传感器。将修饰电极与黄嘌呤氧化酶的酶促反应相结合，可制得次黄嘌呤生物传感器。该传感器表现出较宽的线性响应范围（3.0×10^{-8} ～ 2.8×10^{-5}M）和较高的灵敏度 [（673±4）μA·M^{-1}·cm^{-2}]，检测限为 10nM，对鱼样本中的次黄嘌呤分析结果与参考值相吻合。Huang 等人利用石墨烯和聚苯胺纳米线（PANIw）修饰玻碳电极（GCE），制备出一种新型的 DNA 生物传感器。石墨烯和 PANIw 的协同作用所赋予的优异电子转移特征，使石墨烯 /PANIw 复合材料对互补 DNA 序列的检测表现出快速的电流响应、高灵敏度和良好的贮存稳定性。将石墨烯与纳米材料复合是一种增强功能性的有效方法，这些基于石墨烯复合材料的生物传感器对葡萄糖、胆固醇、Hb、DNA、H_2O_2、O_2、小生物分子等的检测显示出优异的灵敏度和选择性。然而，基于石墨烯的材料和器件的发展目前仍处于萌芽时期，未来还需继续拓展这些材料和器件在电分析和电催化领域的科学研究。

2. 生物光活性材料

光活性材料的研究与开发，特别是以有机分子为主体的光致变色材料的研究

已经成为材料科学研究领域的热点。光致变色材料在紫外光和可见光的照射下能产生可逆变色效应，其特殊的光学性质在光信息储存、防伪、光控开关等光电领域具有广阔的应用前景。光致变色材料还可作为纳米载体用于药物的包封与光控释放等方面，因此深入开展光活性材料的研究具有重要的实际意义和理论意义。

螺吡喃、螺噁嗪类化合物可以通过光调控改变自身结构来实现某些功能。在紫外光的照射下，螺吡喃化合物能实现由疏水的螺吡喃（闭环结构）向亲水的花菁结构（开环结构）的转换。该类化合物与氨基酸、聚合物以及小分子量凝胶等结合，可构建各种光控的功能化材料。偶氮类化合物经紫外光照射后，其结构由顺式变为反式，在可见光或加热的条件下又会转变成原来的结构。利用偶氮化合物在反式结构状态时表现出更高极性的特点，可用来制备可控制的疏水表面，基于多肽、核苷酸、环糊精、血清等偶氮类化合物已成功应用到水凝胶体系、超分子体系中。Akon 等将制备的螺吡喃－甲基丙烯酸甲酯共聚物涂在金属表面上，探究其光致变色过程中表面亲水—疏水的转换情况。研究表明，经过紫外光照射的聚合物表面接触角降低了 11° 并且水滴半径增加。同时将血小板和骨髓干细胞施涂于聚合物表面，观察紫外—可见光调控的变化情况，经过紫外调控后血小板和干细胞分离状况良好。利用该方法可以制造微型神经网络。

3. 生物磁功能材料

磁性生物功能材料具有小尺寸效应、良好的磁导向性、生物相容性、生物降解性和活性功能基团等特点。磁性生物纳米材料具有生物活性、亲和性或反应活性，可结合各种功能分子，如酶、抗体、细胞、DNA 或 RNA 等，因而在靶向药物、酶的固定化、免疫测定、细胞的分离与分类等领域可望广泛应用。

具有磁导向性的药物载体微球可以靶向定位于作用对象，从而增强疗效，减少副作用。通常的靶向药物载体微球是运用了载体对机体各组织或病变部位亲和力的不同，或将单克隆抗体与载体结合，使药物能够转运到特定的治疗部位。在外加磁场的作用下，磁靶向性的药物载体微球可以更方便地把载体定向到靶部位。Widder 等首先提出了磁靶向药物传递系统的概念，并开展了载药磁性微粒的研究。研究表明：载药磁性微粒具有高效、低毒、高滞留性的优点，但由于制备的微粒为 1 ～ 3 μm，可引起血栓样血管栓塞，甚至导致实验动物死亡。纳米级的磁性微球可以解决这个问题。Gupta 等将磁性蛋白微球作为阿霉素的靶向药物载体用于老鼠体内动物实验，取得了良好的效果。Masuko 等将葡聚糖磁珠插入热敏脂质体制备成温度敏感磁性脂质体，施加磁场将磁性脂质体定向于病变部位聚集，

获得了一种新的肿瘤治疗手段。徐慧显等用葡萄糖磁性微球固定化 L- 天冬酰胺酶治疗急性淋巴白血病，也取得了良好的治疗效果。Kubo 等应用纳米级磁性阿霉素脂质体靶向治疗仓鼠骨肉瘤，结果显示，磁性脂质体可提高药物在肿瘤区和骨肉瘤最常见转移区肺中的含量，从而提高疗效并减轻毒副作用。常津等通过氧化还原法首次将抗人乳腺癌单抗/阿霉素/葡聚糖磁性毫微粒同时联结，制备阿霉素免疫磁性毫微粒，并进行放射性标记。采用 Y 显像技术，动态观察体内磁靶向定位情况，结果证实阿霉素免疫磁性毫微粒具有较强的磁靶向定位功能。目前应用磁性药物治疗的肿瘤多位于体表或离体表较近，若治疗深部器官或组织的肿瘤，需要提高磁性微球的磁化强度，优化纳米微球的粒径分布。

生物高分子例如酶等都具有很多官能团，可以通过物理吸附、交联、共价偶合等方式将其固定在磁性微球的表面。用磁性纳米微球固定化酶的优点是：易于将酶与底物和产物分离；可提高酶的生物相容性和免疫活性；能提高酶的稳定性，且操作简单、成本较低。Bendikiene 等制备了壳聚糖磁性微球，用作固定化载体，酶固定后可用磁性装置从反应物中方便地分离回收。朱以华等制备了表面富含羧基和环氧基的磁性聚苯乙烯高分子微球以及表面含氯甲基的磁性高分子微球，环氧基化和氯甲基化的磁性微球由于其表面的环氧基和氯甲基非常活泼，可以不需连接剂活化而直接与生物配基偶合，利用磁性微球对血管内皮生长因子核酸探针进行了纯化分离。丁小斌等制备了 Fe_3O_4/ 聚（苯乙烯 - 环氧乙烷大单体）微球，该磁性纳米微球载体可用于蛋白质和酶的纯化、回收以及酶的固定化、纸胞分离等领域。

免疫分析在现代生物分析技术中是一种重要的方法，它在对蛋白质、抗原、抗体及细胞的定量分析中发挥着巨大的作用。在免疫检测中，经常利用一些具有特殊物理化学性质的标记物如放射性同位素、酶、胶体金和有机荧光染料分子等对抗体（或抗原）进行偶联标记，在抗体与抗原识别后，通过对标记物的定性和定量检测而达到对抗原（或抗体） 检测的目的。磁性纳米微球具有超顺磁性，为样品的分离、富集和提纯提供了很大方便，因而磁性纳米微球在细胞分离和免疫检测方面得到了广泛关注。磁性纳米微球性能稳定，较易制备，可与多种分子复合使粒子表面功能化。如果磁性微球表面引接具有生物活性的专一性抗体，在外加磁场的作用下，利用抗体和细胞的特异性结合，就可以得到免疫磁性微球，利用它们可快速有效地将细胞分离或进行免疫分析，具有特异性高、分离快、重现性好等特点。J hunu 等用外源凝结素分别修饰聚苯乙烯磁性微球和白蛋白磁性微球从而分离红细胞。Wedemeyer N 等将高分子磁性微球结合不同的 DNA 快速分离

各种不同的细胞。Mccole 等用磁性纳米微球成功分离被肝吸虫感染过的成年牛外周血中的 T 淋巴细胞。John 等用连有单克隆抗体的磁性纳米微球检测沙门氏菌，速度快、灵敏度高且抗干扰能力强。洪霞等选用葡聚糖包覆超顺磁性的 Fe_3O_4 纳米粒子，通过葡聚糖表面的醛基化实现与抗体的偶联，制得了 Fe_3O_4/ 葡聚糖 / 抗体磁性纳米生物探针，在组装有第二抗体和抗体的全层析试纸上进行的层析实验表明：该探针完全适用于快速免疫检测的需要，达到了层析免疫检测的目的。

基因治疗是将遗传物质导入细胞或组织进行疾病的治疗。基因导入的方法有病毒载体和非病毒载体。病毒载体存在制备困难，装载外源 DNA 大小有限制，能诱导宿主免疫反应及潜在的致瘤性等缺点。多价阳离子聚合物，如目前广泛应用的脂质体，具有病毒载体的优点，而没有其缺点。但是聚合物的颗粒大小是影响转染效率的因素之一，目前要控制阳离子聚合物大小的合成方法还不很成熟，且阳离子聚合物的细胞毒性是影响转染的突出问题。磁性 Fe_3O_4 生物纳米颗粒的制作简单，直径可达 10nm 以下，具有比表面积效应和磁效应。纳米颗粒的表面可吸附大量 DNA，在外加磁场的作用下，可具有靶向性，且 Fe_3O_4 的晶体对细胞无毒。为达到生物相容性，在磁性 Fe_3O_4 的晶体表面可很容易地包埋生物高分子，如多聚糖、蛋白质等形成核壳式结构，因此磁性生物纳米颗粒可成为较好的基因载体。向娟娟等合成了适合快速免疫检测的葡聚糖包裹磁性 Fe_3O_4 纳米微球并评价了其吸附 DNA 能力及保护 DNA 免遭核酸酶降解的能力，同时用体外基因转染来证实磁性 Fe_3O_4 生物纳米颗粒作为基因载体的可行性。

4. 形状记忆生物功能材料

自 1981 年发现热致形状记忆高分子交联聚乙烯以来，形状记忆功能高分子材料得到了很大发展，并作为功能材料的一个分支受到广泛关注。形状记忆功能高分子材料与其他功能材料相比，具有六大特点：①形变量大，使用方便；②原料充足，品种多，形状记忆回复温度范围宽；③质量轻，易包装和运输；④加工容易，易制成结构复杂的异型品，能耗低；⑤价格便宜，仅是金属形状记忆合金的 1%；⑥耐腐蚀，电绝缘性和保温效果好。形状记忆高分子材料（SMP）品种繁多，根据形状回复原理可分为热致形状记忆高分子材料、电致形状记忆高分子材料、光致形状记忆高分子材料和化学感应型形状记忆高分子材料。

形状记忆生物功能材料应用前景是在医疗器械方面。第一个例子是用激光活化的装置去除血栓。通过比较小的外科手术，装置被植入血管内，在激光活化作用下，形状记忆材料回复到永久的线团形状，从而将血栓去除。现今很多国家面

临肥胖问题，大多数情况下，人们通过控制食欲来解决。形状记忆聚合物应用其中的解决办法是由一个生物可降解的胃内植入聚合物，在预定的时间发生膨胀，使人在吃得很少的情况下产生饱了的感觉。形状记忆泡沫还可以用来调整人类耳朵的形状，使助听器能够很好地固定。这种聚氨酯发泡材料以其 T_g 作为转变温度，已经在商业上得到应用。另外一种应用则是作为阻止中风的支架。

牙齿矫正需要的聚合物要有可取的外观和形状记忆效应。2007 年，Eliades 发表了一篇论文，讨论了聚合物材料制成的牙齿矫正线。在随后的一年，Jung 和 Cho 发表了使用形状记忆聚氨酯作为矫正线矫正牙齿的论文。通过熔融纺丝的方法把聚乙内酯（PCL）拉伸，通过不同的要求得到不同长度和厚度的纺丝材料，以替代不锈钢来调整牙齿的位置。

在最近的研究中，具有生物活性的聚合物线圈得到研究者的注意。在聚合物上包覆一层白金线圈，当其接触血液就会发生溶胀，可达到其原来体积的 9 倍左右，因而能减少线团的数量和手术的时间。在动物实验研究中，聚氨酯线圈诱发阻塞的速度比金属线圈要快一些。此外，一个从聚氨酯发展而来的 SMP 线圈系统已在体外进行了测试。研究者们初步提出了用 SMP 泡沫治疗颅内动脉瘤的基本构象。一个 SMP 泡沫通过一定的设计能慢慢地扩展填补整个动脉瘤（图 5-1-1），这将可能降低安装多个线圈的复杂性，避免线圈膨胀引起的破裂，减少手术时间。它的多孔结构，允许机体细胞的浸润并进入，从而形成新的内膜，最终将胸主动脉瘤病人的肿瘤顶部堵住。Metcalfe 等报道了利用聚氨酯泡沫（定义它作为冬眠弹性记忆化学泡沫材料）治疗颈动脉瘤的模型。在研究中，这种材料有很好的细胞相容性，而且在体内环境中有很好的降解性，这在动脉瘤的治疗中应用前景良好。

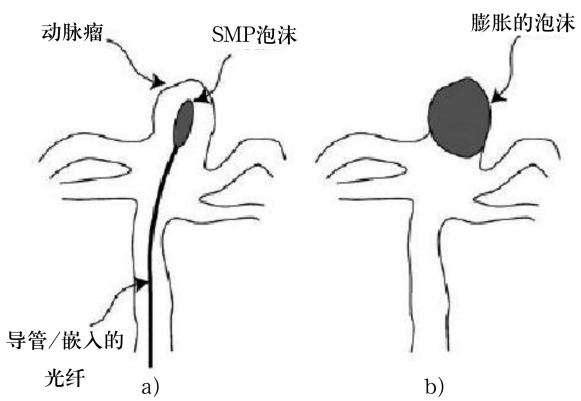


图 5-1-1　SMP 泡沫对动脉瘤栓塞治疗

a）光感应纤维用来激光加热　b）聚合物膨胀的形状将整个动脉瘤充满

5. 仿生功能材料

仿生功能材料又称生物拟态材料，是根据生物拟态方法制造的新材料。目前仿生材料的制备方法可简单地归纳为以下两种：一是通过制备与生物结构或形态相似的材料以替代天然材料，如光子晶体材料、仿生空心结构材料、仿生离子通道、仿生物体骨骼等；二是直接模仿生物的独特功能以获取人们所需要的新材料，如仿蜘蛛丝超韧纤维、仿荷叶超疏水材料、仿贝壳高强材料、仿壁虎脚高黏附性材料等。

顾忠泽等人将聚苯乙烯微球与 SiO_2 纳米粒子超声分散，然后用玻璃片在其悬浮液中提拉成膜，空气中晾干后于 450℃下煅烧除去聚合物，经氟硅烷修饰后可得到具有构造显色功能和超疏水特性的反蛋白石结构膜。北京航空航天大学江雷课题组在利用 DNA 纳米技术构筑表面 DNA 功能分子器件以及纳米孔道体系内电解质流体输运行为的理论与实验基础上，将 DNA 分子与纳米孔道体系相结合，开发出仿生智能响应的人工离子通道体系，通过生物分子的构象变化实现了合成孔道体系的开关功能。首先在经单个高能重离子轰击的高分子材料的基底上，制备出尖端只有几个到几十个纳米的圆锥形单纳米孔道，然后将具有质子响应性的功能 DNA 分子马达接枝在纳米孔道内壁上，通过改变环境溶液的 pH 值，使 DNA 分子马达发生构象变化，完成通道的打开和关闭（图 5-1-2）。这种新型的仿生离子通道体系弥补了蛋白质离子通道的不足，可以很容易地与其他微纳米器件结合，组成更为复杂和多功能化的复合型纳米器件。这不仅为新一代仿生智能纳米器件的设计和制备提供了一种新的方法和思路，同时也为设计用于生物分子筛选和淡水过滤的选择性滤膜提供了重要参考依据。

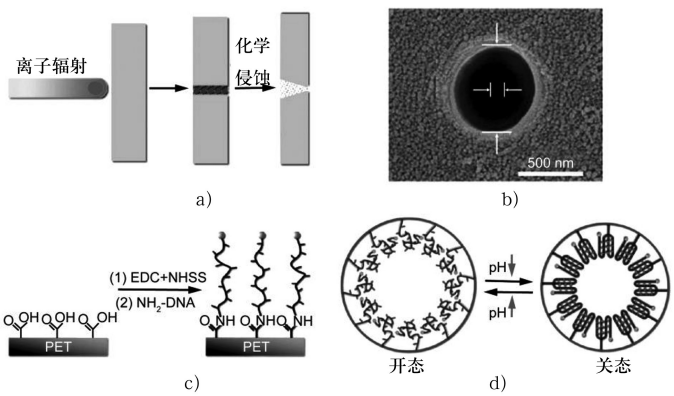


图 5-1-2　仿生智能响应人工离子通道体系构筑示意图

a）利用离子径迹刻蚀技术构筑纳米孔道过程示意图　b）无 DNA 接枝时纳米孔道的扫描电子显微镜照片　c）利用两部化学反应技术将 DNA 马达接枝到纳米孔道内壁　d）具有 pH 响应的分子马达示意图

Baughman 研究小组将经表面活性剂分散的单壁纳米碳管（直径约 1nm）与聚乙烯醇均匀混合在一起形成凝胶状纤维，然后将其放入盛有聚乙烯醇溶液的容器中，利用纺丝技术可以得到长度达 100m 的单壁纳米碳管/聚乙烯醇复合纤维（直径约为 50μm）。这种纳米碳管复合纤维具有良好的强度和韧性，其拉伸强度与蜘蛛丝相同，但韧性高于目前所有的天然纤维和人工合成纤维材料，比天然蜘蛛丝高 3 倍，比 kevlar 纤维强 17 倍。

2002 年，江雷课题组发现在荷叶表面微米结构的乳突上还存在纳米结构，乳突的平均直径为 5 ～ 9μm，每个乳突表面分布着直径（124±3）nm 的绒毛。此外，荷叶乳突之间的表面也具有纳米结构。这些研究结果表明，荷叶表面的微/纳米多级结构和低表面能的蜡质物使其具有超疏水和自清洁功能。水黾稳定的水上运动特性源于其特殊的微/纳米多级结构效应，研究发现在水黾腿部微米级的刚毛上存在着螺旋状纳米级沟槽结构，吸附在沟槽中的气泡形成气垫，从而使水黾能够在水面上自由穿梭。Dhinojwala 研究小组将具有多尺度结构的多壁纳米碳管阵列覆盖到 100 ～ 200nm 厚的聚甲基丙烯酸甲酯和聚丙烯酸十八酯聚合物的表面得到了仿壁虎柔性贴片。以硅片为基底，通过光刻、催化剂沉积以及化学气相沉积三个过程可以得到多尺度结构的多壁纳米碳管阵列。这种新型的黏合材料具有与壁虎脚底刚毛类似的结构和功能，对许多物体表面（包括 Teflon）都具有较强的黏附力并且能够反复黏贴、扯下，其黏附强度是壁虎脚的四倍。发展仿生功能材料，首先要对生物结构原型进行深入研究，以便充分利用它的功能；其次，要有合理的数学、物理、化学结构模型，使功能得以实现；再者进行适当的功能材料的选择和匹配，以达到生物功能的目的。生物膜、酶、DNA 这些基本组织都具有多种独特的功能，因此人们将研究的重点转向生物膜、酶、DNA 功能的模仿，并试图直接与工业生产相结合，创造出可观的效益。

1.2 生物功能材料的发展历程

生物医用高分子材料的发展经历了三个阶段。第一阶段始于 1937 年，其特点是所用高分子材料都是已有的现成材料，如用丙烯酸甲酯制造义齿的牙床。第二阶段始于 1953 年，其标志是医用级有机硅橡胶的出现，随后又发展了聚羟基乙酸酯缝合线以及四种聚（醚－氨）酯心血管材料，从此进入了以分子工程研究为基础的发展时期。该阶段的特点是：在分子水平上对合成高分子的组成、配方和工艺进行优化设计，有目的地开发所需要的高分子材料。目前的研究焦点已经从寻找替代生物组织的合成材料转向研究一类具有主动诱导、激发人体组织器官

再生修复的新材料，这标志着生物医用高分子材料的发展进入了第三个阶段。其特点是：这种材料一般由活体组织和人工材料有机结合而成，在分子设计上以促进周围组织细胞生长为预想功能。其关键在于诱使配合基和组织细胞表面的特殊位点发生作用以提高组织细胞的分裂和生长速度。在国外，生物医用高分子材料研究已有 50 多年的历史，早在 1947 年美国已发表了展望性论文。随后，美国、日本、欧洲等工业发达国家不断有文章报道，有些已在临床应用。我国医用高分子材料的研究起步较早、发展较快，目前有 50 多家单位从事该方面的研究，现有医用高分子材料 60 多种，制品达 400 余种，用于医疗的聚甲基丙烯酸甲酯每年达 300t。然而，我国医用高分子材料的研究目前仍然处于经验和半经验阶段，还没有能够建立在分子设计的基础上。自 20 世纪 70 年代开始进行人工器官的研制以来，已有部分器官进入临床应用。在 1980 年成立了中国生物医疗工程学会后，1982 年又成立了中国医学工程学会人工脏器及生物材料专业委员会，促使生物医学器材进一步发展。生物医用高分子材料作为一门边缘科学，融合了高分子化学和物理、高分子材料工艺学、药理学、病理学、解剖学和临床医学等方面的知识，还涉及许多工程学问题。生物医用高分子材料的发展，对于战胜危害人类的疾病，保障人民身体健康，探索人类生命奥秘具有重大意义。

第 2 章　国内外生物功能材料产业发展现状

2.1　国外生物功能材料发展现状

生物材料产品的研究与开发不仅具有巨大的经济效益又兼有重大的社会效益。随着文明进步以及经济的快速增长，人类更加注重生活品质，更加注重康复和保健，这给予生物材料产业庞大的市场。与此同时，交通工具大量涌现，生活节奏加快，这给疾病、自然灾害、意外事故的发生提供了温床。因此，发展用于人体组织和器官再生与修复的生物医用材料具有重大社会效益。

国际社会日益重视生物材料的研究与产业发展。生物材料的研究和产业化对社会和经济的重大作用正日益受到各国政府、产业界和科学界的高度重视，其研究与开发被许多国家列入高技术关键新材料发展计划，并迅速成为国际高技术制高点之一。美国国防部将生物材料列入五种高技术关键新材料发展规划。德国、日本、加拿大、法国、澳大利亚及韩国等国家和地区纷纷公布自己的生物材料研

究计划及巨额投资来吸引人才或引导投资，以期能够在此领域内的世界性竞争中占一席之地。美国、西欧、澳大利亚和日本均组建了 10 余个高级别多学科交叉的国家生物材料与工程中心。

近年来，世界生物材料市场发展势头更为迅猛，其中 1995—2010 年，全球生物材料市场规模增长 19 倍，达到 4 000 亿美元。就市场需求面而言，主要市场增长动力来自于欧、美、日等国家老年人口数目提升及慢性疾病问题逐渐增加，对于人工关节等骨科应用及心脏支架等心血管应用的需求持续攀升，预期未来市场将仍维持稳定成长趋势。同时由于全球生物医用材料的应用领域的扩展、产品技术的改良和人们对生物材料产品接受度的逐渐提升，也是促使生物材料市场需求和提升市场规模的主要推动力。预计在不久的将来生物医用材料及其制品产业成为 21 世纪经济的一个支柱性产业。

2.1.1 可开发的生物功能材料资源

生物医用高分子材料主要有天然生物材料和合成高分子材料。

1. 天然生物材料

天然生物材料具有很高的生物功能和很好的生物适应性，在保护伤口、加速创面愈合方面具有强大的优势。

甲壳质主要存在于甲壳类、昆虫类的外壳和霉菌类细胞壁中，是甲壳素和壳聚糖的统称（壳聚糖是甲索壳脱酰后的产物），甲壳质壳聚糖纤维已有成熟的制备工艺。甲壳素具有极强的生物活性及生物亲和性，脱酰后的甲壳质（即壳聚糖）具有相容性、粘合性、降解性及良好的成纤、成膜能力，已广泛地应用于医药、纺织、化工、食品、生物技术等众多领域。如壳聚糖纤维制得的手术缝合线是最为理想的手术缝合线；壳聚糖纤维制造的人造皮肤，有利于创口愈合，在各类人造皮肤中其综合疗效最佳。

丝素纤维和丝素膜是近几年得到迅速推广应用的一类天然生物材料，已用于酶固定化、细胞培养、创面覆盖材料和人工皮肤以及药物缓释材料等医学各领域，各种再生丝素膜在人工皮肤、烧伤感染创面上的应用显示了独特优势。

2. 合成高分子材料

合成高分子材料成为现代医学的重要支柱材料。

使用于人体植入产品的高分子合成材料包括聚酰胺、环氧树脂、聚乙烯、聚乙烯醇、聚乳酸、聚甲醛、聚甲基丙烯酸甲酯、聚四氟乙烯、聚醋酸乙烯酯、硅橡胶和硅凝胶等。应用场合涉及组织粘合、手术缝线、眼科材料（人工玻璃体、

人工角膜和人工晶状体等）、软组织植入物（人工心脏、人工肾、人工肝等）和人工管形器（人工器官、食道）等。

随着环保概念的提出，环保意识的增强，生物可降解高分子材料的开发和应用也日益受到政府、企业和科研机构的重视。目前为止，开发的具有生物可降解性的高分子材料主要以国外产品为主，国内还远远不能满足需要。聚乳酸类高分子是目前已开发应用于生命科学新增长点 —— 组织工程的生物可降解材料。但是，当前应用的生物可降解材料在生物相容性、理化性能、降解速率的控制及缓释性等方面仍存在诸多未解决的问题。

2.1.2 生物功能材料应用现状

生物功能材料的研究在于开发生物材料的物理、化学、生物特性的应用。与一般功能材料相比，生物功能材料具有如下特性：①效率高，如酶的催化效率是一般催化剂催化效率的 $10^7 \sim 10^{13}$ 倍；②灵敏度高，如生物传感器是一般传感器灵敏度的 $10^3 \sim 10^5$ 倍；③功能多，如生物膜具有反应器、光电转换、信息交换、分离输送等多种功能；④能自我复制，如重复功能，能繁殖；⑤能适应环境变化，如外界条件变化后能自身调整，保持自己的功能。

我国将生物功能材料的发展分为两个方面，即功能生物材料和仿生功能材料。

1. 功能生物材料

研究和开发功能生物材料，特别是光电材料，应用前景十分广阔。在能源方面，通过对生物光电材料的开发研究，可得到生物燃料（H_2）。这是能源的主要组成部分，有“绿色能源”之称，具有来源广泛、无污染、用途广等优点，是未来洁净能源的开发方向。将麦秸、谷草、豆秸等农作物废料变成多糖、氨基酸等有用原料也是很热门的话题。目前发展起来的生物反应器就是仿牛瘤胃的功能，把各种能消化多种物质的消化酶及分解纤维素的酶，在反应器中培养，将谷草等转化成化工原料，其关键在于分解纤维素酶这种功能生物材料。

从高技术应用方面来看，功能生物材料主要应用于计算机、人工智能和信息及处理等方面。生物芯片是以生物高分子为骨架，包裹与固定具有半导体功能的特殊有机物而制得的具有集成电路功能的元件。如美国研制成功的“血红蛋白集成电路”在 $1mm^3$ 体积内含 10 亿个门路电话、110 亿个比特信息，运算速度比人的思维速度快 100 万倍，但体积却为现用硅芯片的十万分之一，有可能用于进一步发展生物计算机。人的感觉器官是信息接收和处理最灵敏的部分，一直想把它用于高科技领域。如宇宙飞船坐舱内的气体识别，就使用一种功能生物材料。它

是一种酶，模拟苍蝇嗅觉器官，由化学反应引起电脉冲经过放大后发出警报。根据光－化学、化学－电的原理，苏联用一种非银盐的显色信息记录材料和酶结合，模拟人的视觉，在光的作用下，使显色剂产生显色反应，相当于人眼见到的物体。有人试图将这种信息记录材料发展成人工眼，但功能差。

生物功能材料与国防建设密切相关，有着愈来愈广泛的应用前景。生物光电材料通过微生物作用得到的H_2等生物燃料可作为火箭和高级涡轮发动机的燃料，可广泛用于航空、航天、舰船等领域；有效的生物电池可用于宇航及其他军事装备上。由生物光电材料研究得到的生物传感器等高技术产品可满足各种不同的军事目的。美国在这些领域的研究处于世界前列，他们在生物成矿、生物电子材料、生物合成技术、天然系统的模拟、生物处理技术（如生物脱漆）以及“生物工厂”等方面开展工作，并力图将研究结果用于军事装备上。

2. 仿生功能材料

仿生功能材料指模仿生物的各种特点或特性而开发的材料。自然界中存在的天然材料有着人工材料无可比拟的优越性能，通过研究他们的特点特性，制造人类能使用的材料。例如，研究萤火虫发明人工冷光，研究电鱼发明伏特电池，研究苍耳属植物发明尼龙搭扣，研究鲨鱼发明特质泳衣等。自然界中许多生物都具有多通道的超细管状结构，例如，许多植物的茎都是中空的多通道微米管状结构，既保证了足够的强度又可以有效节约原料和输运水分及养料；鸟类的羽毛也具有多通道管状结构，可以减轻重量并保温；许多极地动物的皮毛也具有多通道或多空腔的微/纳米管状结构，从而具有卓越的隔热性能。据此，中国科学院化学所有机固体研究院重点实验室的江雷研究小组已经成功制备出具有内部通道的数目可控的多通道TiO_2微纳米管。

生物可降解材料是指在适当的和可表明期限的自然环境条件下，能够被微生物（如细菌、真菌和藻类等）完全分解变成低分子化合物的材料，在食品容器和包装行业已经广泛应用。生物可降解材料已经被广泛应用于食品容器和包装行业。生物可降解包装材料一般是将可降解的高分子聚合物加入到层压膜中或直接与层压材料共混成膜。生物可降解材料大多采用添加淀粉和光敏剂的方法，与聚乙烯等材料共混生产。

（1）包装材料　在包装材料中，研究最多的是利用淀粉、纤维素、甲壳素等天然高分子材料本身或改性制成食品容器和包装塑料。例如聚合剂将直链淀粉重构化形成一种特殊的超高分子结构，该物质具有良好的加工性和生物降解性。

英国的 Porvair 公司开发的聚氨酯玉米淀粉塑料性能特殊，降解速度快，淀粉添加量可达 50%，可透气并吹塑成薄膜，广泛用于食品包装。日本幸和工业株式会社开发的聚乙烯淀粉型生物降解塑料，作为包装用的一次性缓冲材料与普通聚乙烯缓冲材料相比，表观密度高，遇水容易降解。但是尽管含淀粉基的塑料比一次性塑料制品有效，但是由于仍然采用不能生物降解的聚乙烯或聚酯材料，所以除了添加的淀粉能降解外，剩余的不可降解材料仍然残留在环境中，分解为碎片无法回收，使情况更糟。

（2）农业　理想的农用材料能与其他生物降解材料协同作用，从而转化为提高土质的材料。生物可降解材料在农业上主要作为农用地膜和农作物生长容器。国外有人将淀粉掺杂在低密度聚乙烯中埋藏在土壤中，50 天后即可被微生物降解。国内的北京塑料研究所在低密度聚乙烯和高密度聚乙烯等基础原料中添加光降解剂，制备出含有多种化学物质的生物降解浓缩母料，该地膜已经在国内十几个省市的农田使用，取得了较好的效果。

（3）医用　医用材料不仅要有良好的医疗功能还要无毒并对身体安全，所以要求材料具有良好的生物兼容性。在材料完成医疗作用后，在一定时间内能被水解或降解成小分子参与正常的代谢循环而被人体吸收或排泄。生物可降解材料已经被广泛应用于血管外科、矫正外科、体内药物释放基体和吸收性手术缝合线等医疗领域。

通过不断从生物界获得灵感，仿生材料越来越向着微观化、智能化发展。由各种功能材料集成出各种仿生微观器件，并组装出不同结构和功能的仿生微系统用于军事等高技术领域是今后研究的重点。仿生功能材料的研究涉及生物科学、材料科学、医学、化学及力学等多学科的知识，需要相关学科专家的共同参与。只有加强多学科的共同协作，才能够更深入地推动该学科的技术进步和创新发展。

2.2　我国生物功能材料科技与产业规模

生物功能材料产业的发展强烈依赖于相关技术领域先进技术的支持与经济实力，另外还要有微电子技术、精密加工技术、软件开发技术以及良好的政策环境做支持。目前发达国家依靠其顶尖的科技创新和经济实力，主要生产技术含量高的生物材料，其技术装备非常先进。各种高档的加工中心、专用机床、激光微加工及涂层等设备已装备于生物材料企业，自动化、信息化技术已在生产中广泛应用，最先进的检验设备在大公司中随处可见，先进的技术装备确保了其产品的先进性及市场的垄断地位。在世界各主要发达国家加速推进生物技术发展的背景下，

我国于 2010 年明确将包含生物医药在内的生物产业列入国家战略性新兴产业。

为促进生物产业集聚式发展，引导社会资源集中投向重点地区，推动我国生物产业的健康快速发展，促进各地方形成具有特色的生物产业，避免重复建设和分散资源，按照“统筹规划、发挥优势、分类指导、稳妥推进”的原则，“十一五”期间，国家发改委选择产业基础好、创新能力强、市场化水平高、开放性强的地区，分批建设国家生物产业基地和国家高技术产业基地，已认定石家庄、长春、深圳、长沙、北京、上海、广州、武汉、昆明、青岛、成都、重庆 12 个国家生物产业基地，以及西安、天津、泰州、通化、德州、郑州、南宁、哈尔滨、杭州、南昌 10 个生物产业领域国家高技术产业基地。

国家的引导和地方的推动极大地加快了生物产业的集聚化发展，逐步在全国培育形成了长江三角洲、珠江三角洲和京津冀地区三个综合性生物产业基地，以及东北地区、中西部地区若干专业性生物产业基地的空间布局，促进生物企业、资金、技术、人才等要素向优势地区集中，加快生物产业向集聚化、特色化发展，集聚效应初步显现。2007 年，12 个国家生物产业基地共实现工业总产值 3 145 亿元，同比增长 21%，占全国生物产业的近一半。为促进生物产业聚集发展，各地方通过健全机构、调动资源，出台了一系列配套优惠政策，为大力发展一批生物产业基地奠定了良好基础。基地的建设对于营造生物产业发展环境、大规模聚集国内外生物产业资源，优化生物产业结构与布局，尽快形成具有国际竞争力的生物产业增长极，辐射和带动我国生物产业快速发展起到了重大作用。

2006 年 10 月，国家发改委批准了上海张江生物医药基地、北京大兴生物医药产业基地和广州生物产业基地三个国家级生物产业综合基地；2009 年，国务院出台了《促进生物产业加快发展的若干政策》；国家发改委提出将上述国家生物产业基地建设成为国内重要的综合性生物产业研发、生产和出口基地。近年来，我国已有多个地区建立了各种生物产业园区，但国内生物产业发展最好、最集中的仍然是上海、北京、广州三个城市。

1. 上海生物材料基地

上海按“1+4”架构进行空间布局，“1”即一个核心区，是张江高科技园区；“4”即四个扩展区。重点发展基因工程药物、现代中药、化学合成创新药物、生物医学工程等领域的新产品，积极推动重大项目的实施，促进大型生物企业集团整合和中小企业发展，逐步形成创新体系完善、产业特色鲜明、布局合理的国家综合

性生物产业研发、生产和出口基地。2007 年上海市医药工业总产值为 388.96 亿元，连续 7 年保持年均 17% 以上的高速增长，成为上海市主要新兴产业之一。

2008 年 7 月，国家质检总局批复同意上海检验检疫局在张江高科技园区开展进境生物材料检验检疫试点改革工作，并提出了减少检疫审批时间、简化检疫审批环节、报送材料从简及实施分批核销许可等六条意见。试点以“事前备案、优化审批、强化监管、确保安全”为原则，在保证生物安全的前提下，努力提高生物医药研发企业进口生物材料的通检效率，增强上海生物医药发展的国际竞争力。2009 年 3 月，首批试点正式启动，张江高科技园区共 10 家生物医药企业通过考核，成为第一批试点企业。截至 2010 年 6 月，上海检验检疫局共受理第一批试点企业报检的生物材料 540 余批次，进境生物材料通检速度得到极大改善，为生物医药科研项目争取了宝贵时间。2010 年年初，上海检验检疫局又将改革试点全面扩展到浦东新区范围，上海药明康德新药开发有限公司成为扩大试点的首家单位；2010 年 10 月又有科文斯医药研发（上海）有限公司等 10 家成为第二批试点企业。截至 2012 年年底，获得试点资格的企业已占有检验检疫业务有关的企业总量的近 60%。

2. 广州国家生物产业基地

广州特色基地规划由两个核心区、扩展区和辐射区组成，总体规划面积约 13km^2，重点发展基因工程药物、现代中药、化学合成创新药物、海洋药物四大生物医药领域，着力发展生物农业，推进生物服务业（生物技术研发等）发展。

广州国家生物产业基地以广州高新区科学城和生物岛为核心，被列为国家“十一五”期间重点推进的国家综合性生物产业基地。近年来，广州生物产业进入快速发展轨道，产业结构不断优化，产业规模逐年扩大。目前，广州科学城已有生物企业 300 多家，不久的将来预计将增加至 1 100 多家。2009 年广州生物产业完成工业总产值 866.97 亿元；2010 年总产值超过 1 000 亿元，并已初步形成了生物医药、生物农业、生物制造 3 个优势产业群和海洋生物、生物服务两个特色产业群。近年来广州生物医药从业人数稳步增长，2010 年广州规模以上医药工业从业人员人数达 2.5 万人。

2011 年 9 月 25 日，国家质检总局与广东省政府在北京联合签署了《国家质检总局与广东省人民政府关于共同建设全国加工贸易转型升级示范区加快推进广东外经贸发展方式转变合作备忘录》，其中第八点“支持战略性新兴产业发展”提出“支持广东建设生物材料检验检疫监督管理改革试点园区，研究出台配套政

策，给予减少审批环节、简化审批材料、建立风险评估机制、实施分批核销、出境实行口岸备案放行等便利措施”。在此基础上，广东检验检疫局应地方政府要求向国家质检总局提出申请，拟将广州高新区建设成为生物材料检验检疫监督管理改革试点园区。2012 年 8 月，广州高新区生物材料检验检疫试点园区揭牌，成为全国第二个试点园区。2013 年 7 月，广州瑞博奥生物科技有限公司通过广东检验检疫局组织的专家评审和考核，获批广州高新区首家生物材料检验检疫监督管理改革试点企业。

3. 北京生物产业基地

北京是我国生物工程与医药产业科研中心，有中国医学科学院、中国疾病预防控制中心、军事医学科学院、中国中医研究院、协和医科大学、北京医科大学、首都医科大学、国家食品与药物监督管理局、中国药品生物制品检定所等生物医药研究临床教学和管理机构，人才聚集，科研成果丰厚，为产业基地发展提供了有力的智力支撑。产业基地生物医药产业集聚效应初步形成，大兴区域内已有生物工程与医药企业和研发机构 82 家，其中包括三元基因、协和制药在内的企业 73 家，研发机构 9 家，占全市同类企业总数的 25%，产值近 23 亿元，占全市总量的 28%。

产业基地已引进生物医药项目 28 个，初步形成了如下产业格局：以国家兽医微生物中心、全国畜牧兽医总站和中国生物药品检定中心为龙头，形成食品、药品和兽药检定及技术执法核心区域；以中国中医研究院、国药集团、同仁堂集团、绿谷集团为龙头，形成中药研发及生产核心区域；以三元基因、北生药业为龙头，形成生物制品生产及研发核心区域；以恒利制药、协和制药为龙头，形成化学药生产及研发核心区域；以双鹤药业、麦邦医疗设备、浚达丰医疗器械为龙头，形成医疗器械和制药设备研发及生产核心区域；以军事医学科学院药物所、中国医科院药物所为龙头的药物研发创新核心区域。

北京特色基地由中关村生命科学园、北京经济技术开发区和中关村大兴生物医药基地 3 个核心区构成，基地重点发展基因工程药物和生物医学工程产品。

4. 石家庄基地

该特色基地依托石家庄经济技术开发区，核心区规划面积 17km^2，拥有华药、石药、四药股份等相关生物企业 40 余家，总投资超百亿元。目前重点建设项目共 178 个，分为四大类：一是化学制药领域，二是生物制药领域，三是现代中药领域，四是公共配套领域。2006 年实现销售收入 280 亿元。

5. 长春基地

长春特色基地由三大模块构成：医药产业核心区坐落在长春高新技术产业开发区，生物工业核心区布局在长春经济技术开发区，生物农业核心区布局在城东的净月潭旅游经济开发区，总占地面积达 13.4km^2。

目前为亚洲最大的疫苗和基因药物生产基地。在生物制造领域，长春大成实业集团为世界最大的赖氨酸生产商。

6. 深圳基地

特色核心区为深圳市高新技术产业园区，扩展区为光明和南澳两个片区。产业用地将近 3km^2。2006 年销售收入超过 1 000 万元的企业 123 家，其中产值 1 亿～ 10 亿元的企业 36 家。

通过建立完整的生物产业技术支撑平台和产业配套系统，深圳成为国内市场化程度最高、功能最齐全的成果转化基地，最具竞争力的创新药物研发及产业化基地，技术含量最高的医疗器械产品生产基地。

7. 长沙基地

该基地是我国中部地区第一个国家生物产业基地，基地设“一园五区”，已形成 11 个医药产业群，其中，在生产规模上，中药戒毒药列全国第一、生物疫苗和抗生素制剂列中南地区第一、减肥类保健品列全国第三、中药标准化提取物列全国第二。2007 年，基地实现工业总产值 70.63 亿元。

8. 青岛基地

特色产业技术主要集中在生物医药、农业生物技术和工业生物技术及传统生物技术等领域。2007 年，基地实现工业总产值 86.4 亿元，同比增长 32.7%。

建设目标：到 2015 年，海洋生物企业达到 500 家左右，生物产业年产值实现 600 亿元；到 2020 年，生物产业年产值达到 1 200 亿元。

9. 武汉基地

特色核心区包括东湖开发区关南生物制药园、江夏现代中药园、葛店化学合成创新药物园、南湖生物农业园四大特色产业园区，占地面积为 30km^2。2007 年生物产业产值 81.12 亿元。在生物制剂、诊断试剂及芯片产品、诊疗中心等方面具有明显优势，生物疫苗位居全国第五位。

10. 成都基地

特色核心区是成都高新区，2007 年生物医药和生物农业总产值 421 亿元，其中生物医药 193 亿元，生物农业 228 亿元。该基地有两大发展方向：一是大力

发展生物医药，包括现代中药、创新药物、生物医学工程、生物医药服务；二是加快发展资源技术主导型的生物农业、生物能源。

11. 昆明基地

特色基地重点发展以良种产业，跨国重大动物疫病，有害生物物种入侵安全性评价、检测产品，生物农药、生物肥料为主的生物农业产业。

12. 重庆基地

重点发展六大产业领域：生物医学工程、中药材规范化种植与现代制药、兽药及绿色农用生物产品、特色生物育种、生物质工程、生物技术服务业。

13. 哈尔滨基地

特色生物医药产业是哈尔滨市重点培育的五大支柱产业之一，具有资源优势。哈尔滨是全国重点粮豆产区和重要的绿色食品基地，其辖区及周边地区生物资源丰富，农产品特别是绿色食品和畜产品的深度开发潜力巨大。

14. 德州基地

全市已集聚各类生物企业 300 余家，其中规模以上生物企业 102 家，现有销售收入过 10 亿元的 8 家，过亿元的 38 家。2007 年生物产业实现产值 220 亿元，其中生物制造产业达到 160 亿元，占全部生物产业产值的 73%。低聚木糖生产能力世界第一、木糖醇生产能力世界第二、低聚糖生产能力亚洲第一，综合生产能力达 50 万 t，占全国产能的 70%。现已形成全国最大的大豆高蛋白生产基地。

15. 泰州基地

已初步形成以生物医药为核心，生物能源、生物农药等辅助发展的产业体系。2007 年，生物产业销售额为 256 亿元，其中，生物医药产业销售额为 180 亿元，占比 70.3%。全市生物医药产业经济总量连续 5 年、经济效益连续 9 年居江苏省第一。扬子江、苏中、济川、江山等在内的龙头企业均已跻身全国医药行业的百强。

16. 郑州基地

郑州生物农业特色突出，研发水平、产业规模、产品市场占有率都处于国内领先地位。2007 年生物产业销售收入超过 200 亿元，年均增长 41.1%。

17. 通化基地

建设核心区、扩展区、辐射区 3 个功能分区的 9 个产业园区和 2 个物流中心。2007 年，通化医药产业实现产值 202 亿元，占全市 GDP 的 27.2%，占吉林省医药产业的 37.4%。

18. 南宁基地

南宁市高技术产业集群重点发展非粮生物能源产业，设立生物能源产业、生物医药产业、生物制造产业、生物农业产业四个专业生物产业分基地。建设目标：到 2020 年，生物产业年产值将达到 1 530 亿元左右，其中生物能源年产值占生物产业年产值比例超过 38%，达到 580 亿元。

19. 西安基地

西安高新技术产业开发区重点突出生物药业开发，杨凌地区重点突出生物农业开发。打造“生物工程技术研发—生物医药”产业链，建设陕南原料药种植加工基地，西安、咸阳、杨凌生物技术研发生产基地和生物医药研发服务外包基地。到 2017 年基本建成具有陕西特色的区域创新体系。

20. 天津基地

努力构建以出口为导向、以现代生物医药为主体，生物工业和生物农业快速发展的生物产业格局，建成集研发、生产、销售和服务为一体的国内一流、世界重要的现代生物产业制造基地和关键技术的研发转化基地。2006 年全市生物产业产值近 300 亿元。

21. 南昌基地

2007 年全市生物产业资产总额 450 亿元，主营业务收入 420 亿元，完成工业增加值 140 亿元，利税 78 亿元，生物高技术企业 80 余家。2007 年全市生物产业出口额 4.1 亿美元。

22. 杭州基地

目前已形成以生物技术药物为核心、现代中药为基础，现代化学药物与新型医疗器械协同发展，生物农业形成特色优势，部分领域居国内领先水平的产业特色。生物产业一直是杭州市重点发展的高技术产业，以医药和农业为主体，2007 年生物产业总产值约 300 亿元。

2.3 生物功能材料科技与产业现行政策

我国新材料产业目前正处于强劲发展阶段，国家发改委已经组织实施了 100 多个新材料高技术产业化专项，有力地推动了我国具有自主知识产权的新材料产业的发展。许多省市都将新材料作为优先发展领域，积极争取“863”计划、“973”计划和火炬计划等支持，在各项科技计划中给予新材料领域重点支持。为推动新材料产业的发展，全国各地的特色产业基地已经成为继高新技术开发区后的促进

科技成果转化及产业化的有效形式。

2.3.1 财政补贴政策

国家对战略性新兴产业实行重点扶植政策，在一定范围内实行财政补贴政策，其中生物产业（下设生物医药产业、生物医药工程产业、生物农业产业、生物制造产业）作为一个重要的战略性新兴产业也列入其中。

生物产业作为战略性新兴产业，财政补贴政策在配套政策中占据重要地位，培育和发展战略性新兴产业的重要政策手段之一。然而，财政补贴政策比较笼统和概括，缺乏具体明确的实施细则和补贴标准，可能导致在实施过程中存在过多的随意性。同时，财政补贴通常以货币或实物为主，补贴手段比较单一。

2.3.2 税收优惠政策

目前，生物医药产品以及部分国家产业政策鼓励出口的高科技产品等，出口退税率已经由 13% 提高到 17%；艾滋病药物、基因重组人胰岛素冻干粉等生物医药商品的出口退税率由 5% 分别提高到 11% 和 13%；生物医药中涉及抗艾滋病病毒药品、避孕药品免征增值税。

2009 年 6 月 5 日，国务院办公厅就正式发布《促进生物产业加快发展的若干政策》，确定了现代生物产业发展重点领域，包括生物医药、生物农业、生物能源、生物制造、生物环保五大领域，并具体规定了对生物产业实施税收优惠的办法。其中，高新技术生物企业可按 15% 的税率征收企业所得税。该政策确定了现代生物产业发展重点领域。在生物医药领域，重点发展预防和诊断严重威胁我国人民群众生命健康的重大传染病的新型疫苗和诊断试剂。积极研发对治疗常见病和重大疾病具有显著疗效的生物技术药物、小分子药物和现代中药。加快发展生物医学材料、组织工程和人工器官、临床诊断治疗康复设备。推进生物医药研发外包。

在生物农业领域，重点发展优质、高产、高效、多抗的农业、林业新品种和野生动植物繁育种源。大力发展生物农药、生物饲料及饲料添加剂、生物肥料、植物生长调节剂、动物疫苗、诊断试剂、现代兽用中药、生物兽药、生物渔药、微生物全降解农用薄膜等绿色农用生物制品，推进动植物生物反应器的产业化开发，促进高效绿色农业的发展。开发具有抗病和促进生长功能的微生物药品及其他生物制剂，保护和改善水域生态环境，发展健康养殖。

在生物能源领域。加快培育速生、高含油、高热值、高产专用能源植物品种，合理利用荒山荒地，推进规模化、基地化种植；积极开展以甜高粱、薯类、小桐

子、黄连木、光皮树、文冠果以及植物纤维等非粮食作物为原料的液体燃料生产试点，推动生物柴油、集中式生物燃气、生物质发电、生物质致密成型燃料等生物能源的发展。

在生物制造领域。加快推进生物基高分子新材料、生物基绿色化学品、糖工程产品规模化发展。支持农产品精深加工和食品生物制造技术、装备、工艺流程的研发及规模化生产。开发新型酶制剂，发展生物漂白、生物制浆、生物制革和生物脱硫等清洁生产工艺，加快生物制造技术推广应用，降低物耗、能耗和污染。

在生物环保领域。重点发展高性能水处理絮凝剂、混凝剂、杀菌剂及生物填料等生物技术产品，鼓励废水处理、垃圾处理、生态修复生物技术产品的研究和产业化。支持荒漠化防治、盐碱地治理、水域生态修复、抗重金属污染、超富集植物等新产品的生产和使用。

实施税收优惠政策，要加大财税政策支持力度。首先，加大对生物技术研发与产业化的投入。特别要加大对重要生物技术产品研发、产业化示范项目的支持。对完全可降解生物材料和经批准生产的非粮燃料乙醇、生物柴油、生物质热电等重要生物能源产品，国家给予适当支持。鼓励企业、科研机构、高校和个人申请植物新品种、专利、商标等知识产权。

其次，建立财政性资金优先采购自主创新生物产品制度。各级国家机关、事业单位和团体组织使用财政性资金采购生物产品的，应优先购买列入政府采购自主创新产品目录中的生物产品。

最后，实施税收优惠政策。生物企业为开发新技术、新工艺、新产品发生的研发费用，未形成无形资产计入当期损益的，在按照规定据实扣除的基础上，再按照研发费用的 50% 加计扣除；形成无形资产的，按照无形资产成本的 150% 摊销。对被认定为高新技术企业的生物企业，按照税法规定减按 15% 的税率征收企业所得税。对国家需要重点扶持和鼓励发展的生物农业、生物医药、生物能源、生物基材料等生产企业，进一步完善相关税收政策。

政策还表示，积极支持中小生物企业中小板和创业板上市，积极拓宽生物企业融资渠道。首先，引导社会资金投向生物产业。鼓励设立、发展生物技术创业投资机构和产业投资基金，鼓励、引导金融机构支持生物产业发展，支持信用担保机构对生物企业提供贷款担保。支持金融机构创新信贷品种，改进金融服务，对符合条件的生物产业发展项目、生物产业基地基础设施提供信贷支持。积极探索利用贴息、小额贷款等方式，加大有效信贷投入。其次，支持生物企

业利用资本市场融资。积极支持符合条件的中小生物企业在中小企业板和创业板上市，鼓励符合条件的生物企业在境内外上市筹资。开展生物产业基地内具备条件的生物企业进入证券公司代办系统进行股份转让试点，推进未上市生物企业股权的流通，拓宽创业投资退出渠道。支持符合条件的生物企业发行企业债券、公司债券、短期融资券和中期票据等，开展生物产业基地内企业联合发行企业债券试点。

2.4 生物功能材料科技与产业发展存在的问题

世界各国功能材料的研究极为活跃，新技术、新专利层出不穷。发达国家企图通过知识产权的形式在特种功能材料领域形成技术垄断的态势已引起我国的高度重视，我国在新型稀土永磁材料、生物医用材料、生态环境材料、催化材料与技术等领域加强了专利保护。但是，我国功能材料的创新性研究不够，申报的专利数，尤其是具有原创性的国际专利数与我国的地位远不相称。我国功能材料在系统集成方面也存在不足，有待改进和发展。

与发达国家相比，我国的生物功能材料总体研发水平还有很大差距，表现为创新能力不强，拥有自主知识产权的成果不多，核心技术受制于人，在成果转化为生产力方面较差，高性能、高附加值的产品较少，产学研一体化程度不高，产业技术集成能力差，难以大规模工业化生产。另外，我国的加工技术及制造水平也比发达国家落后很多。

近年来，随着我国社会经济水平的提高和人们健康意识的不断增强，生物产业得到了迅速发展，其对经济发展所做的贡献也在逐年增加。当前我国的生物产业除了杂交水稻技术在国际上处于较为领先的地位外，总体而言与发达国家仍然差距较大，需要重点发展后基因组技术、生物医药工程、生物育种等，同时要在生物制药产业和生物制品上加强人才培养和引进计划，提高资金投入和使用效率，形成生物产业链。

2.4.1 科技与产业布局

生物技术已经成为现代科技研究和开发的重点。在发达国家，生物技术已经成为一个新的经济增长点，其增长速度大致为 25% ～ 30%，是整个经济增长平均数的 8 ～ 10 倍。我国生物医药 15 年大致增长 100 倍。

在生物技术领域，我国已列出 10 大领域、35 类关键技术，力争培育 1 000 多家大型企业，以实现生物经济强国战略。未来我国将重点发展新兴疫苗、小分

子药、新兴中药、高产优质农作物、生物农药、生物制药业、生物能源、环境生物技术。同时，扩大生物技术产业链，发展生物材料。

我国的生物产业发展不平衡，没有形成完整的科技产业化链条，西部的生物产业转化率更少。如云南蕴藏了丰富的生物资源，但是目前还没有形成集中化的平台，缺乏规模化生产企业。

2.4.2 技术创新

截至 2000 年，我国生物技术产业产值已经达到 200 多亿元，北京、上海、广州、深圳等地已建立了 22 个生物技术园区，涉及现代生物技术的企业约 500 家，从业人员超过 5 万人，其中涉及医药生物技术的企业 300 多家，涉及农业生物技术的企业 200 多家。截至 2006 年，我国现代生物技术产业的年产值达到 600 亿元，传统生物技术产业的年产值逾 3 000 亿元。

但是我国的生物企业普遍规模较小，自主创新能力不足。目前我国生物企业以中小企业为主，缺少国际领先技术和实力雄厚的龙头企业。另外我国生物企业的研究开发投入少，研发投入比重只为 0.11%，生物医药产品的 90% 以上都为仿制品，技术含量低。生物科技转化率不高，据调查我国科技成果产业化率普遍不到 15%。

2.4.3 人才体系管理建设

生物技术产业的迅猛发展以及生物技术在医药、农林、畜牧业、食品业等产业的大规模应用，都亟须大量的生物技术人才，目前国内许多高校都开设了生物功能材料相关的课程。

生物科学长期以来一直是基础学科，培养的人员多从事科学研究和基础教学，因此生物技术领域具有硕士以上学位的高学历人才资源丰富，本科层次的技术人员相对匮乏。而生物技术企业需要的人才是多层次的，既需要负责产品研发和项目管理的高级研发人才，更需要具有一定专业知识技能、能够配合研发人员完成项目开发或技术创新的一般技术人员。在我国，技术人员的培养主要是依靠中等和高等专科职业教育来完成，然而，专科层次技术人员的知识结构技能已经越来越不适应现代科学和技术发展的趋势，这一现象在生物技术产业非常突出。明确人才培养方向对于当前的生物人才培养体系建设具有重要意义。人才市场上已经积累了不少高级科研人才，如果不根据市场需求及时进行规划调整，必然会降低高级人才的市场价值，最终会反馈到教育层次，使国家大量投入的资源产生闲置和浪费。可见，扩展生物技术人才的层次结构，培养出更多不同层次的专业技术人员是生物技术产业发展对教育体制改革创新提出的迫切要求。

现代生物技术产业化发展过程中需要大批掌握成熟技术规范和特定实验技术，能够独立设计改进实验方案，能够管理符合现代技术规范的大型生物实验室或生物制品生产车间的高级应用型人才。

由于生物学是一门前沿科学，随着学科的发展和与其他学科的交叉，生物技术的基础知识结构和基本技能也在不断丰富和扩充。近年来，计算机技术在生物学尤其是基因组学和蛋白质组学上的应用愈来愈深入，基于生物学和信息技术交叉而衍生的生物信息学已逐渐成为生物技术人才所具备的基本知识和技能。所以，只有调整和改善生物技术人才的知识结构和基本技能才能培养出更加适应生物产业发展要求的专门人才。

2.4.4 政策保障

我国的现行体制、投融资机制，科技创新体系和医药体制等都限制了生物产业的发展。

在管理体制方面，我国在生物产业的研发、生产、人才培养等管理方面却分散在不同的管理部门，导致政策不配套，有限的资源利用率不高。

融资体制方面，我国的创业投资不发达，融资渠道单一，金融创新落后，制约了生物产业的迅速发展。

科技创新方面，我国的科技中介体系不发达，工程化环节薄弱，导致科技成果转化率较低。

近年来，为了推动生物产业发展，各级政府财政都不同程度地增加了投入，但仍没有根本缓解企业资金的矛盾。

第 3 章 我国生物功能材料资源潜力分析

3.1 资源开发利用现状

生物资源是自然资源的有机组成部分，是指生物圈中对人类具有一定经济价值的动物、植物、微生物有机体以及由它们组成的生物群落。生物资源包括基因、物种以及生态系统三个层次，对人类具有一定的现实和潜在价值，它们是地球上生物多样性的物质体现。自然界中存在的生物种类繁多、形态各异、结构千差万别，分布极其广泛，对环境的适应能力强，如平原、丘陵、高山、高原、草原、荒漠、淡水、海洋等都有生物的分布。目前已经鉴定的生物物种约有 200 万种，

据估计，在自然界中生活着的生物有 2 000 万～ 5 000 万种。它们在人类的生活中占有非常重要的地位，人类的一切需要如衣、食、住、行、卫生保健等都离不开生物资源。此外，它们还能提供工业原料以及维持自然生态系统稳定。

目前我国在很多省份都开展了药用植物的种植及动物的饲养，开发利用丰富的生物资源。

3.1.1 森林资源开发利用现状

据第八次全国森林资源普查，全国森林面积 2.08 亿公顷（1 公顷 =1 万 m^2），森林覆盖率 21.63%。活立木总蓄积 164.33 亿 m^3，森林蓄积 151.37 亿 m^3。天然林面积 1.22 亿公顷，蓄积 122.96 亿 m^3；人工林面积 0.69 亿公顷，蓄积 24.83 亿 m^3。森林面积和森林蓄积分别位居世界第五位和第六位，人工林面积仍居世界首位。

我国仍然是一个缺林少绿、生态脆弱的国家，森林覆盖率远低于全球 31% 的平均水平，人均森林面积仅为世界人均水平的 1/4，人均森林蓄积只有世界人均水平的 1/7，森林资源总量相对不足、质量不高、分布不均的状况仍未得到根本改变，林业发展还面临着巨大的压力和挑战。

3.1.2 草地资源

我国拥有草场约占国土面积的 42%，但是人均只为世界的 52%。草地可利用面积比例较低，优良草地面积小，草地品质偏低；天然草地面积逐年缩减，质量不断下降，90% 的草地不同程度的退化。

3.1.3 海洋生物资源

海洋中生活着 20 余万种生物，占地球上整个生物物种的 80%，是开发医药、食品及化工等产品的巨大宝库。海洋中的生物为了生存繁衍，在竞争中取胜并使自己适应海洋的独特环境，如高压、低营养、低温（特别是深海）、无光照以及局部的高温、高盐等生命极限环境，在漫长的进化中各自形成了特殊的结构和奇妙的生理功能，为人类提供了众多结构新颖、功能独特和生理活性很强的活性物质，包括萜类、甾醇类、生物碱、甙类、多糖、肽类、核酸、蛋白质、酶等。例如，为了适应海洋环境，海洋微生物有了新的特异性，因而产生相应的陆栖微生物所不能产生的新颖生物活性物质，这些天然产物有许多（如褐藻酸、琼胶糖）是陆地生物所没有的，它们是人类保健和药品的天然宝库。

我国海洋生物技术取得了显著的成果。海洋生物资源的开发利用已形成比较系统的技术体系，具备一定的技术基础。

3.2 资源开发潜力

我国是生物多样性最丰富的国家之一，有 3 万多种高等植物，6 347 种脊椎动物和 599 类陆生生态系统类型。其中，生物特有属种比例大，动植物区系起源古老，珍稀物种众多，从而提供了大量可资利用的生物资源。丰富的生物资源是具有战略价值的无形资产，也是我国在知识产权竞争格局中比较优势所在，善加利用，可以在我国经济建设和科学技术发展中发挥重大作用。生物资源具有重要的科学研究价值，为医学、农业、制药等生物技术创新提供样本或工具，进而形成产业应用。基因运用于基因工程，野生植物品系用于育种，野生动植物或其提取物用于生物制药，可能产生巨大的经济效益。

3.2.1 农林业生物资源开发潜力

我国生物资源开发利用潜力大，主要有以下四类：

一是玉米等粮食类作物，容易利用，在不影响粮食安全的前提下可适度发展。

二是非粮农作物，包括木薯、甜高粱等，基本不与粮争地。如木薯、甜高粱抗旱涝、耐贫瘠、耐盐碱，油菜可与水稻复种，可开发性较强，具备 3 000 万 t 生物燃料的潜力。

三是木本油料植物。国家林业局统计，我国有 30 多种植物种子含油率 40% 以上，可规模化培育，其中，麻疯树、油桐等六个树种如能进一步定向培育，资源潜力很大，可生产生物液体燃料 1 000 万 t 以上。

四是秸秆、农林废弃物。资源量极为丰富，高达 15 亿 t，可生产液体燃料 3.75 亿 t。随着油价上涨，成本差距在缩小，部分生物化工产品还具备了良好的经济效益。

就燃料乙醇来看，目前以玉米为原料的燃料乙醇补贴水平，已比期初下降了近一半。此外，木薯、甜高粱生产正逐步接近盈亏平衡点。就生物柴油来讲，虽然以油菜籽为原料的生物柴油成本仍高出较多，但以餐饮废油为原料的生产已有利润。

3.2.2 海洋生物资源开发潜力

我国海域辽阔，浅海滩涂资源丰富，为海洋渔业生产奠定了良好的基础，海洋渔场总面积为 281 万 km^2（约 42 亿亩），沿岸潮间带滩涂面积 2 875 万亩（1 亩 =666.7m^2），10m 水深以内的浅海面积 11 014 万亩，可进行人工养殖的面积逾 200 万亩。我国海洋鱼类有 1 694 种，其中经济价值较大的 150 多种，浅海滩涂生物资源 2 267 种，其中重要的增养殖生物资源 8 种。但是我国的海洋生物

资源利用水平，在世界范围内属中下水平，而渔业资源开发程度居世界六个大陆架大国前列，过度捕捞的状态相当严重。

3.3 资源可持续性

在目前的社会经济技术条件下，人类可以利用与可能利用的生物包括动植物资源和微生物资源等。生物资源具有再生机能，如利用合理，并进行科学的抚育管理，不仅能生长不已，而且能按人类意志进行繁殖更生；若不合理利用，不仅会引起其数量和质量下降，甚至可能导致灭种。

近代工业革命以来，由于对自然界的不当开发利用，地球系统脆弱的生态平衡已经被破坏。研究表明，现在每年大约有 10 000 个物种消失，灭绝的速度是史前时期的 100 ～ 1 000 倍。预计未来 30 年，人们将失去 5% ～ 10% 的热带雨林，随之将有 60 000 个植物品种，甚至更多的脊椎动物和昆虫灭绝。

金属镍、钴及稀土元素是制备先进生物功能材料的重要原料。

3.3.1 金属镍

镍是一种具有铁磁性和良好塑性的金属元素，主要用于制备金属合金及化学反应的催化剂。用电解镍制造的不锈钢和各种合金钢被广泛地用于飞机、坦克、舰艇、雷达、导弹、宇宙飞船和民用工业中的机器制造、陶瓷颜料、永磁材料、电子遥控等领域。金属镍具有良好的延展性，几乎没有急性毒性，一般的镍盐毒性也较低，所以在生物材料方面也具有广泛的应用。齿科的镍铬烤瓷合金在口腔修复中应用广泛，临床应用时间长，价格低廉，制作工艺相对容易。镍钛合金在 20 世纪 70 年代被发现具有良好的生物相容性，在生物医学领域已被广泛研究与应用。近等原子比的镍钛合金具有抗疲劳、耐磨、生物惰性等其他材料不可比拟的优越性能，还具有独特的形状记忆效应和超弹性，是一种优异的骨移植材料。

镍资源主要为硫化镍矿和红土镍矿，由于金属镍的应用广泛，硫化镍矿资源已经日益枯竭，开发红土镍矿成为必须。21 世纪以来，随着镍价的攀升和我国经济发展对金属镍的需求加大，而硫化镍矿资源又满足不了要求，开始从印度尼西亚和菲律宾等东南亚国家大量进口红土镍矿。

3.3.2 金属钴

钴是具有光泽的钢灰色金属，比较硬而脆，有铁磁性，加热到 1 150℃时磁性消失。钴的化合价为 +2 价和 +3 价。在常温下不和水作用，在潮湿的空气中也很稳定。

钴是生命科学中极为重要的生命元素，是生物体内必需的微量元素，在氢酶、甲基辅酶 M 还原酶、一氧化碳脱氢酶、超氧歧化酶和尿酶中均发现其活性中心含有钴离子。实验表明，钴的配合物对绿脓杆菌、金黄色葡萄球菌、八叠球菌及大肠杆菌均有较强的抑菌性能。

地壳中钴的含量为 0.001 8%，主要以伴生元素存在于镍、铜、铁矿中。我国已探明钴的地质储量约为 140 万 t，矿山保有储量 47 万 t，绝大多数为伴生矿。伴生于硫化镍铜矿的钴主要分布在甘肃、四川、吉林、新疆、陕西等地、伴生于铜、铁矿中的钴主要分布于四川、山西、河南、安徽、湖北、广东等地，少量钴土矿则产于云南、江西、广东等地。

伴生于硫化镍铜矿中的钴是我国主要的钴矿资源，用此原料生产的钴占全国产量的一半以上，以金川镍铜矿为首位。钴在矿石中品位很低，仅为 0.03% ～ 0.05%，以类质同象形式赋存于镍、铜硫化矿物及黄铁矿中，无法用选矿方法富集成钴精矿，一般在提镍过程中使其富集于某个中间产品（如转炉渣贫化处理产出的富钴）。

3.3.3 金属钛

钛是一种银白色的过渡金属，其特征为重量轻、强度高、具金属光泽，耐湿氯气腐蚀。

钛被认为是一种稀有金属，这是由于在自然界中其存在分散并难于提取。但储量相对丰富，在所有元素中居第十位。钛的矿石主要有钛铁矿及金红石，广布于地壳及岩石圈之中。钛亦同时存在于几乎所有生物、岩石、水体及土壤中。从主要矿石中萃取出钛需要用到克罗尔法 或亨特法。钛最常见的化合物是二氧化钛，可用于制造白色颜料。

钛作为植入材料始于 1930 年，是骨科常用的医用金属材料中耐蚀性能最好、比重最轻（约为其他材料的一半）的材料。纯钛强度较低，弹性模量比其他金属更接近于天然骨，并且密度小重量轻，是所有硬组织植入材料中综合性能最好的。钛合金（Ti-6Al-4V）强度较高。

钛及其合金的耐磨性差，制成的人工关节的磨损碎屑在体内积存会造成人体组织变异。通过氮化处理可改善其耐磨性能，已取得临床效果。Ti-50Ni 合金是新发展起来的形状记忆合金，有形状记忆效应并有良好的力学性能，其摩擦损耗只有钛的几十分之一。

我国的钛资源非常丰富，是世界钛资源大国，其储量位于世界前列，约占世

界钛金属储量的 48%。共有钛矿床 142 个，分布于 20 个省区。

3.3.4 稀土金属

我国拥有丰富的稀土矿产资源，成矿条件优越，堪称得天独厚，探明的储量居世界之首，为发展中国稀土工业提供了坚实的基础。

稀土金属是 17 种特殊元素的统称，都是很活泼的金属，性质极为相似，易形成稳定的配合物。稀土金属已经广泛应用于电子、石油化工、冶金、机械、能源、轻工、环境保护、农业等领域。应用稀土可生产荧光材料、稀土金属氢化物电池材料、电光源材料、永磁材料、储氢材料、催化材料、精密陶瓷材料、激光材料、超导材料、磁致伸缩材料、磁致冷材料、磁光存储材料、光导纤维材料等。在钢铁、铸铁和合金中加入少量稀土能大大改善性能。用稀土制得的磁性材料磁性极强，用途广泛，在化学工业中广泛用作催化剂。稀土氧化物是重要的发光材料、激光材料。

核磁共振成像自 20 世纪 70 年代出现以来，因为其出色的成像技术、无损检测手段及精确广泛的检测能力，被广泛应用于医学、生物学等领域。将顺磁性的金属钆与合成大分子、靶向性、天然大分子、荧光探针的配体螯合，可制得功能磁性共振造影剂，可以有效增加弛豫效果，降低生物毒性。

但是由于过去几十年无节制的开采，这些矿产资源日益匮乏，还给环境造成了不可挽回的影响，这些都是值得注意的。

3.4 资源开发措施

为了使生物资源得以持续利用，必须强调保护的原则与战略。

一类是就地保护，即在原生地既保护种群，又保护它们赖以生存的环境与整个生态系统。

一类是异地保护，将物种迁出原生地加以保护，例如种子库、基因库，也包括利用超低温对生殖细胞与胚胎的保护等。

要强调科学管理，其管理原则与方法的核心要求，是要使开发利用与物种种群的恢复增殖相协调，利用生物资源的强度与开发速度不能超出生物资源的生态耐受能力，不能破坏生物资源的复原和再生特性，使之不致出现衰退与灭绝。总之，不能“竭泽而渔”或“杀鸡取卵”。对于已经出现衰退的生物资源或退化的生态系统，要通过科学的管理，采取重建或恢复的种种措施，恢复其结构与功能，重现旺盛的再生能力。

3.4.1 矿产资源

矿产资源是自然资源中对人类有重要作用的资源，属于不可再生资源，其储量是有限的。我国的矿产资源具有以下特点：

1. 资源总量大，但人均占有量低，是资源相对贫乏的国家

2012 年铜储量 3 000 万 t，铝土矿储量 8.3 亿 t，铅储量 1 400 万 t，锌储量 4 300 万 t。需求量大的铜和铝土矿的保有储量占世界总量的比例却很低，分别只有 4.4% 和 3.0%，属于我国短缺或急缺矿产，对外依存度也相对较大。我国有色矿产资源总量尽管很大，但由于人口众多，人均占有资源量却很低，是一个资源相对贫乏的国家。

2. 贫矿较多，富矿稀少，开发利用难度大

我国有色矿产数量很多，但从总体上讲贫矿多、富矿少。如铜矿，平均地质品位只有 0.87%，远远低于智利、赞比亚等世界主要产铜国家。铝土矿虽有高铝、高硅、低铁的特点，但几乎全部属于难选冶的一水硬铝土矿，可经济开采的铝硅比大于 7% 的矿石仅占总量的 1/3，这些特点必然增大矿山建设的投资和生产经营成本。

3. 共生、伴生矿床多，单一矿床少

我国 80% 左右的有色矿床中都有共伴生元素，其中尤以铝、铜、铅、锌矿产多。例如，在铜矿资源中，单一型铜矿只占 27.1%，而综合型的共伴生铜矿占 72.8%；在铅矿资源中，以铅为主的矿床和单一铅矿床的资源储量只占其总资源储量的 32.2%，其中单一铅矿床只占 4.46%；在锌矿产资源中，以锌为主的矿床和单一锌矿床所占比例相对较大，占总资源储量的 60.45%，但矿石类型复杂，而且不少矿石嵌布粒度细，结构构造复杂。我国有色矿产资源中，虽然共伴生元素多，若能搞好综合回收，可以提高矿山的综合经济效益，同时由于矿石组分复杂，势必造成选冶难度大、建设投资和生产经营成本高。

4. 分布范围广，地域分布不均衡

我国有色矿产资源分布范围很广，各省、市、自治区均有产出，但区域间不均衡。铜矿主要集中在长江中下游、赣东北和西部地区；铝土矿主要分布在山西、河南、广西、贵州地区；铅锌矿主要分布在华南的广西、湖南、广东、江西和西部的云南、内蒙古、甘肃、陕西、青海等地区；锡锑主要分布在湖南、云南、广西等地区。

从资源的开发上看，我国的铅锌资源开发正逐步从东北、中部向中西部以及

内蒙古转移。除湖南、广东、广西仍保持一部分资源外，铅锌资源开发、矿山主要在向云南、甘肃、四川、青海以及内蒙古转移。

对于矿产资源，要从以下方面进行保护：合理开发利用矿产资源，优化资源配置，实现矿产资源的最优耗竭；限制或禁止不合理地乱采滥挖，防止矿产资源的损失、浪费或破坏；对矿产资源的开发利用进行全过程控制，将环境代价减小到最低限度；保护矿区生态环境，防止矿山寿命终结时沦为荒芜不毛之地。

3.4.2 海洋生物资源

长期以来海洋经济产业结构和布局不尽合理，海洋生物技术力量分散，海洋开发总体科技水平不高，特别是海洋生物资源的开发一直处于粗放式状态，严重阻碍了我国海洋经济产业的发展。应该培养一批具有创新能力的学术带头人，造就一支高水平的科研队伍，形成我国海洋生物高技术创新体系，使我国海洋生物技术再上一个新台阶。

要制定我国海洋生物技术发展的总体规划、发展目标和具体实施步骤。重点资助几个由我国一流的海洋生物技术科研单位共同承担的海洋生物技术研究项目，并鼓励一流的陆地生物技术科学家“下海”，以形成局部优势。

鼓励科研院所、高等学校的科技力量以多种形式进入企业或企业集团，参与企业的技术改造和技术开发；培育海洋生物大型企业或龙头企业，将海洋科技研究和开发的主体逐步转移到企业，形成一批拥有自主知识产权和具有技术创新能力的高新技术企业；建设中试基地，加速海洋生物技术成果转化和产业化进程。

要充分抓住全球重视海洋生物技术开发的有利时机，大力开展国际合作，取得有效的资金、技术方面支持，寻求合作机会。

第 4 章　我国生物功能材料领域发展的风险分析

4.1　生物功能材料科技与产业发展方向的选择

我国第一个生物制品研究所始建于 1919 年，自 20 世纪 70 年代末开始了现代生物技术的研究。国家高度重视生物技术的发展，不仅将其列为“863”计划之首，而且纳入“七五”“八五”“九五”国家重点攻关计划。这一系列的举措，大大促进了我国医药生物技术的发展，并形成了一定的产业规模。

近年来，我国的生物技术取得了很大的发展，初步形成了医药生物技术、农业生物技术、轻化工生物技术、海洋生物技术等门类齐全的生物技术研究、开发、生产的体系，取得了一批具有较高水平的生物技术研究开发成果，开发出一批生物技术产品并投放市场。

生物医用材料作为高新技术的重要组成部分已经进入了快速发展的新阶段，市场销售额以每年 16% 的速度递增，预计在今后的 20 年内，生物医用材料所占的份额将赶上药物市场。生物活性陶瓷已经成为医用生物陶瓷的主要方向；生物降解高分子材料是医用高分子材料的重要方向；医用复合生物材料的研究重点是强韧化生物复合材料和功能性生物复合材料，带有治疗功能的羟基磷灰石研究也非常活跃。

生态环境材料是 20 世纪 90 年代在国际高技术新材料研究中形成的一个新领域，在欧、美、日等国家其研究和开发都非常活跃。主要研究方向是：直接面临与环境问题相关的材料技术，如生物可降解技术、环境污染修复技术等；开发能使经济可持续发展的环境协调材料，如仿生材料、绿色新材料等。

2015 年全球生物医用材料直接市场产值超过 3 050 亿美元，与半导体产业相当。该产业是美国经济最活跃、出口量最大的 6 个产业之一，近年来一直保持每年 20% 以上的持续增长速率。随着可持续发展政策被各国政府广泛采纳，生态环境材料的市场需求也将迅速增加。

4.1.1 技术成熟度

技术成熟度是衡量技术对项目目标满足程度的一种度量方法，是项目风险管理的重要方面。一般来说，成熟的技术是指经过应用和相应的运行环境测试从而使性能满足项目要求的技术。

由美国航空航天局（NASA）于 1995 年首先提出并应用于航天领域的九级技术成熟度标准（TRL），之后在美国科学技术协会得到应用。2001 年，美国国防部（DOD）开始采纳 TRL，现在美军要求将 TRL 应用于所有重要采办计划中。英国国防部及许多国际技术组织也开始应用并推广 TRL。利用该技术成速度指标等级对生物功能材料进行分析，可以发现不同的生物功能材料处于不同的等级。例如仿生材料有些已经进入实际系统并在实践应用环境中得到应用验证，属于 TRL9 最高阶段，技术已经非常成熟。而有些生物制药产品则还处于通过分析和实验室研究阶段，仅仅是对应用设想进行物理验证，处于 TRL3 阶段，技术成熟度还非常低。

2000 年以来，美国国防部将技术成熟度又分为四个发展阶段，即概念研究阶段、技术开发阶段、工程研制阶段以及生产部署阶段。

（1）概念研究阶段　为了满足特定能力，在该阶段需要考虑大量的与特定概念或技术选择方案有关的可用技术，为技术开发阶段提供足够多的技术选择方案。在概念研究阶段，技术成熟度一般要达到 TRL3。

（2）技术开发阶段　在该阶段，经过技术攻关必须达到关键的技术指标要求，以期对系统性能的实现有足够把握。在该阶段需要明确项目的关键技术，要求各项关键技术达到适当的技术成熟度等级。有人认为，关键技术在该阶段至少应达到 TRL5。

（3）工程研制阶段　在该阶段，系统需求和关键技术指标要求均十分明确，一般具有几个备选的技术途径，从而为系统演示验证和设计定型提供比较灵活的选择途径。在该阶段一般要进行系统集成和演示验证工作，以确定系统是否达到设计性能要求，并最终完成实际系统的研制。通过实际系统运行测试，技术成熟度要求达到 TRL8。

（4）生产部署阶段　从工程研制阶段到生产部署阶段是一个重要的转折点，一般要求达到 TRL8 时才可以转入生产部署阶段，否则，往往会出现决策失误。真实系统经过应用验证，技术成熟度可达到 TRL9。

根据该标准，我国的生物功能材料根据种类也分别处于不同的阶段。

从 20 世纪 90 年代末，国内开始逐步重视技术成熟度研究工作，在理论研究和评价方法上进行了探索研究。TRL 是一种适用范围比较广的技术成熟度评价标准，对建立国内技术成熟度评价标准不仅具有重要的参考价值，而且应该具有很强的适用性。我们可以参考 TRL，并结合国情，研究提出国内的技术成熟度评价标准。

4.1.2　资源可获得性

充分利用和合理保护我国丰富的生物资源。我国生物资源丰富，是生物技术研究开发和产业发展的优势条件。但从目前情况看，我国大量的生物资源没有得到有效地保护和利用，甚至一些重要的资源流失严重。因此建议国务院有关部门高度重视生物资源的保护和利用。我国应尽快制定、完善和颁布各类生物资源管理的法规和规章制度，并尽快着手建立健全国家生物资源的保藏及服务体系，其中包括细胞库、菌种库、毒种库、种质库、信息库等。

4.1.3　发展潜力

据统计，我国现有 456 家单位从事生物技术的研究、开发和生产，其中医药

领域的有 165 家，占 36%，专业人员约 6 800 人，已有近二十种基因工程药物、疫苗获准进入市场，数十种医药生物技术产品正在进行临床或临床前研究。

我国需要高度重视人才的培养和引进。建议在大学本科阶段，增设专门的生物技术课程，课程的内容包括广泛的相关领域的综合性知识。在研究生阶段，应开设有关管理和经营方面的课程，大力培养生物技术产业化人才，同时，还应特别重视毕业后的在职教育，及时拓展新知识。特别需要强调的是，应注意培养既懂科技又懂经营与管理的两栖人才。此外，建议国家有关部门制定出台更加明确的有关鼓励和吸引海外留学生和华人科学家归国为国服务的具体政策措施。

4.2 生物功能材料发展的风险

生物功能材料企业基本上都属于高新技术产业，属于先进生产技术范畴。企业开办所需的资金和技术门槛都较高，故所需的固定资产投入及流动资金都需比较充足，才能保障投产之后的正常运行。必须在建厂之前就要做好资金的预算，为企业的正常运转提供充足的资金保障。另外为了加强企业的安全生产管理，保证安全生产资金的有效投入，改善劳动条件，防止工伤事故的发生，保障职工生命和身体健康，企业还需设立安全生产专项资金。

1. 政策稳定性风险

政策不稳定性对行业的发展和经济增长均有显著的影响。研究结果表明官员变更所引发的政策不稳定性对经济增长和行业发展有显著的抑制作用，其中，不确定性预期对行业发展的影响更为突出。总体上说，官员变更对经济增长的财政影响要大于信贷影响。

2. 资源可持续性风险

生物资源属可更新的自然资源，在天然或人工维护下可不断更新、繁衍和增殖；反之在环境条件恶化或人为破坏及不合理利用下，会退化、解体、耗竭和衰亡，有时这一过程具有不可逆性。在社会经济技术条件下人类可以利用与可能利用的生物，包括动植物资源和微生物资源等。

此外，用于合成生物功能材料的矿产资源近几十年也面临无节制开采、盗采而枯竭的危险。所以合理利用及寻找可替代资源是必须考虑的事情。

3. 市场寻求风险

我国的生物技术主要是跟踪国外而发展起来的，产品缺乏创新，这种状况在新药研制中尤为突出。

4. 投融资风险

目前，我国有较大生产规模的生物产业公司 20 多家，产业规模尚小，主要产品为基因工程药物和疫苗，只有 2 ～ 3 家公司的年销售额在亿元以上。现代生物技术产品的研究开发和生产与传统产品不同，原有的一些技术、方法、材料、仪器和装备已经不能满足需要。目前，我国大部分研究开发仪器、试剂和生产装备都需依赖进口，所以投资巨大，这是制约我国生物技术研究开发速度和产业发展的一个很重要的因素。

第 5 章　生物功能材料科技与产业发展战略指导

5.1　我国生物功能材料科技与产业战略指导

5.1.1　我国生物功能材料发展目标

2012 年 7 月 9 日，国务院以国发〔2012〕28 号印发《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》中确立了重点发展方向和主要任务，分别为节能环保产业、新一代信息技术产业、生物产业、高端装备制造产业、新能源产业、新材料产业、新能源汽车产业。在充分发挥企业积极性和市场配置资源基础性作用的同时，在财税金融，特别是体制机制方面，政府应该也必须有所作为，要发挥财政资金引导和调动社会投资积极性的作用。包括增加财政投入，比如集中支持大型科研基础设施公益性基础研发平台建设，设立战略性新兴产业发展的资金，用于重大应用示范工程和引导创业投资发展。

生物功能材料横跨生物产业和新材料产业两大新兴产业。生物产业的目标是：到 2020 年有 30 个以上自主知识产权的新药投放市场，200 个以上药品制剂进入国际主流市场；培育动物新品种（系）20 个，培育高产优质多抗高效农作物新品种 180 个。而对于新材料产业，到 2020 年的目标是：培育拥有自主品牌和较大市场影响力的骨干龙头企业 20 家，成为中高端新材料及产品的生产大国，提高国产高端新材料的自给率。

生物产业面向人民健康、农业发展、资源环境保护等重大需求，强化生物资源利用、转基因、生物合成、抗体工程、生物反应器等共性关键技术和工艺装备开发；加强生物安全研究和管理，建设国家基因资源信息库。着力提升生物医药

研发能力，开发医药新产品，加快发展生物医学工程技术和产品，大力发展生物育种，推进生物制造规模化发展，加速构建具有国际先进水平的现代生物产业体系，加快海洋生物技术及产品的研发和产业化。“十二五”期间，产业规模年均增速达到 20% 以上。

1. 生物医药产业

提高我国新药创制能力，开发生物技术药物、疫苗和特异性诊断试剂；推进化学创新药研发和产业化，提高通用名药物技术开发和规模化生产水平；继承和创新相结合，发展现代中药；开发先进制药工艺技术与装备，发展新药开发合同研究、健康管理等新业态，推动生物医药产业国际化。生物医药产业发展路线图见表 5-5-1。

表 5-5-1　生物医药产业发展路线图

项　目	2015 年	2020 年
发展目标	形成基因工程药物、新型疫苗、抗体药物、化学新药、现代中药等为代表的一批具有国际水平的新药开发平台，制药技术和装备研制水平大幅提升。30 个以上自主知识产权新药投放市场，200 个以上药品制剂进入国际主流市场。产业集中度大幅提升	形成以现代科学技术为支撑、以企业为主导的新药创制和安全评价体系，掌握当代新药创制关键核心技术，基因工程、新型疫苗、抗体工程等新医药的产品技术水平达到世界领先水平，5 个以上创新药物完成国际注册并上市销售，制剂产品在国际主流市场形成规模销售
重大行动	●创新能力建设：建立国家基因资源库、蛋白质库和生物样本库；以化学药物制剂技术、动物细胞高效表达与大规模培养、基因重组治疗性抗体、多肽类药物合成、干细胞治疗、基因治疗、转化医学等为重点，依托优势企业建设完善医产学研紧密结合的新药研发平台 ●新药创制：加快实施重大新药创制、艾滋病和病毒性肝炎等重大传染病防治科技重大专项，研发防治恶性肿瘤、心脑血管疾病、糖尿病等重大疾病的创新药物，开展新药安全评价和新药临床研究 ●产业化：实施基因工程药物和疫苗创新发展工程；促进自主知识产权基因工程药物、疫苗、抗体药物、化学新药、天然药、现代中药新品种、新型中药饮片、中药材规范种植等产业化；提升大规模动物细胞培养、蛋白纯化等生产新工艺技术和新型制药装备的保障能力 ●产业结构优化：全面推进药品生产质量管理体系和产品质量标准体系升级，推动制剂产品进入国际主流市场。优化产业布局，鼓励优势企业兼并重组，促进品种、技术等资源向优势企业集中	
重大政策	●完善药品注册管理、价格管理、集中招标采购等政策 ●完善生物伦理法律法规	

2. 生物医学工程产业

整合产学研优势资源，推进医学与信息、材料等领域新技术的交叉融合，构建生物医学工程技术创新体系，提升新型生物医学工程产品开发能力。研究开发预防、诊断、治疗、康复、卫生应急装备和新型生物医药材料的关键技术与核心部件，形成一批适合大中型医院使用、具有自主知识产权的高端诊疗产品；大力开发高性价比、高可靠性的临床诊断、治疗、康复产品，促进基层医疗卫生机构建设和服务能力提升；发展数字医疗系统、远程医疗系统和家庭监测、社区护理、个人健康维护相关产品等。生物医学工程产业发展路线图见表5-5-2。

表 5-5-2　生物医学工程产业发展路线图

项　目	2015 年	2020 年
发展目标	以高性能影像诊断设备为主，形成具有国际水平的生物医学工程技术和产品研发平台，关键技术和核心部件发展取得突破；高性价比医疗设备产品基本满足基层医疗卫生机构需求。产业集中度大幅提升	形成企业主导、医产学研相结合的生物医学工程产品创新体系和新产品开发能力。高性能诊断治疗设备关键技术自主发展能力大幅提升，产品质量和技术水平达到国际先进水平，规模化进入国际市场
重大行动	●关键技术开发：支持生物医学研发，研究开发高性能临床诊疗设备的核心部件与关键技术，开发高集成度、高灵敏度、高特异性和高稳定性的临床诊断、治疗仪器设备及配套试剂，促进组织工程、介入及微创治疗、康复等产品开发，开发数字化、可移动医疗系统和适用于基层医疗卫生机构的高性价比诊疗设备 ●产业化：实施高性能医学影像设备创新发展工程，带动生物医学工程新技术、新产品产业化发展 ●创新能力建设：依托优势企业建设具有国际先进水平的高性能诊断和治疗设备、综合监护、组织工程、介入及微创治疗以及再生医学等产品创新与技术集成平台 ●产业升级：推进生产工艺创新，完善技术标准体系，强化企业质量管理，鼓励优势企业实施兼并重组，扩大企业规模，提高产业集中度，形成一批具有国际竞争力的大型企业集团 ●健康服务：推动覆盖城乡社区的数字化健康管理系统建设，加强城乡居民健康管理的日常化、实时化、动态化，带动家庭用健康监护设备、健康信息管理、远程医疗服务等相关产品发展，培育健康产业新业态。加强质量及使用安全评价与监督管理体系建设，完善产品市场准入审批程序、定价收费标准	
重大政策	●加强质量及使用安全评价与监督管理体系建设，完善产品市场准入审批程序、定价收费标准	

3. 生物农业产业

围绕保障粮食安全和促进现代农业发展，完善育种科学设施体系，加强生物育种技术研发和产业化，加快高产、优质、多抗、高效动植物新品种培育及应用，推动育繁推一体化的现代育种企业发展，着力提升种业竞争力。积极推进生物兽药及疫苗、生物农药、生物肥料、生物饲料等绿色农用产品研发及产业化，为我国农业发展提供重要支撑。生物农业产业发展路线图见表 5-5-3。

表 5-5-3　生物农业产业发展路线图

项　目	2015 年	2020 年
发展目标	形成一批现代生物育种和农用生物产品创新平台。培育动物新品种（系）20 个，培育高产优质多抗高效农作物新品种 180 个，累计推广 5 亿亩；一批新型绿色农用生物产品实现产业化	形成现代生物育种、农用生物产品创新及安全评价与监督体系。产品发展能力跻身国际先进水平，1 ～ 2 家种子企业进入全球种业 20 强，10 ～ 15 家农用生物制品企业具有国际竞争优势
重大行动	●关键技术开发：加快实施转基因生物新品种培育科技重大专项；突破转基因育种、航天育种、分子标记育种、重离子辐照育种等生物育种和绿色农用生物制品关键技术，加快开发重要农业生物新品种，以及农业生产重大疫病防治新型疫苗、生物农药等绿色农用产品 ●产业化：组织实施生物育种产业创新发展工程，加强新品种的研制，建设育种基地，加快推进重要农作物以及重要畜禽、水产等动植物新品种产业化 ●创新能力建设：建设重要动植物基因资源信息库，完善国家转基因生物安全评价管理体系，建设区域性重要粮棉油作物和主要畜禽生物育种及产业化设施，强化生物育种工程化能力；建设和完善生物肥料、生物农药、生物饲料、生物兽药研究开发设施	
重大政策	●完善有利于生物种业发展的知识产权、生物安全、市场推广和服务体系建设等政策 ●完善现代种子企业扶持政策措施 ●完善转基因安全评价管理	

4. 生物制造产业

以培育生物基材料、发展生物化工产业和做强现代发酵产业为重点，大力推进酶工程、发酵工程技术和装备创新。突破非粮原料与纤维素转化关键技术，培育发展生物醇、酸、酯等生物基有机化工原材料，推进生物塑料、生物纤维等生物材料产业化。大力推动绿色生物工艺在化工、制浆、印染、制革等领域关键工艺环节的应用示范，积极推进工程微生物与清洁发酵技术应用，提升大宗发酵新产品的国际竞争力。生物制造产业发展路线图见表 5-5-4。

表 5-5-4　生物制造产业发展路线图

项　目	2015 年	2020 年
发展目标	生物制造技术能力显著提升，生物基产品在工业化学品中的比重大幅提高。聚乳酸、聚丁二酸丁二醇酯等有机化工原料与工业生物材料等品种实现十万吨级规模化生产。生物新工艺在印染、制浆、漂白、脱胶等工艺过程中达到规模化应用，污染物排放和能耗总量明显降低	形成生物化工产品、生物基材料和生物工艺的规模化发展能力，生物基产品在工业化学品中的比重提高到 12%。生物发酵产业产值和技术达到国际先进水平。化工、印染、制浆、制革等行业 30% 的生产采用生物工艺，污染物排放和能耗总量大幅度降低
重大行动	●关键技术开发：支持先进生物制造科技研发，完善微生物资源中心与基因信息库，突破生物基原材料规模化生产工艺、非粮原料转化、合成生物技术、工程菌开发等关键技术，开发适用于化工、轻工、纺织等行业的生物法生产工艺 ●产业化：建设能源植物等生物质原料规模化生产基地，开展新型工程菌、新型酶制剂、氨基酸、寡糖和生物基材料、生物质纤维、非粮发酵、绿色生物工艺过程的产业化示范及应用 ●创新能力建设：建设工业微生物菌种资源信息库，提升现代发酵工程技术、生物炼制、生物加工和人工菌种设计、开发与工程化能力，建设工程菌生态安全评价技术平台。促进发酵等领域产业技术创新联盟发展	
重大政策	●制定生物基产品认定机制与财政补贴、税收优惠政策	

而对于新材料产业，生物功能材料的发展还要依托于其他功能材料的发展，主要包括大力发展稀土永磁、发光、催化、储氢等高性能稀土功能材料和稀土资源高效综合利用技术。积极发展高纯稀有金属及靶材、原子能级锆材、高端钨钼材料及制品等，加快推进高纯硅材料、新型半导体材料、磁敏材料、高性能膜材料等产业化。另外还要着重发展高性能生物功能复合材料以适应实际的需求。

5.1.2　我国生物功能材料的变化趋势

我国基因工程多肽药物、单抗和新型诊断试剂向创新发展，已能生产目前国际上市的大多基因工程多肽药物，基因工程干扰素 α-1b- 系国际首创，重组人肿瘤坏死因子、bFGF 已申请专利，首创的免疫 PCR 胃癌诊断试剂已获得新药证书，有望开发出一系列的高灵敏度癌症诊断试剂。

基因工程疫苗的研制取得明显进展，基因工程乙肝疫苗投放市场，对乙肝的预防起到了非常重要的作用。双价痢疾疫苗、霍乱疫苗获准试生产，血吸虫疫苗、出血热疫苗等正在进行临床试验。基因治疗取得突破，研制成功具有高效导入功能的靶向性非病毒型载体系统。动物试验表明，该系统能在体内将基因高效导入

肿瘤细胞，明显抑制肿瘤生长；血管表皮生长因子基因缝线等 3 种基因治疗方案已基本完成临床前试验。 获得了一批转基因动物，已获得生长激素转基因猪的第 2、3、4 代。获得手乳腺表达外源基因的转基因羊等。通过研究出现一批创新性成果，克隆了大量人、动物、植物的新基因，创造了具有多种用途的新型表达载体等。

当今世界生物技术迅猛发展，呈现出巨大活力。特别是 20 世纪 90 年代以来，随着人类基因组计划等各类生物基因组研究工作的展开，新基因不断被发现，新技术、新手段不断涌现，生物技术进入了大发展的新时期。与此同时，生物技术产业迅速崛起，并已成为国际市场竞争的第二个热点领域。

5.1.3 实现战略目标的具体方案

近年来，我国的生物技术取得了很大的发展。初步形成了医药生物技术、农业生物技术、轻化工生物技术、海洋生物技术等门类齐全的生物技术研究、开发、生产的体系，取得了一批具有较高水平的生物技术研究开发成果，开发出一批生物技术产品并投放市场。生物技术在许多领域已发挥重要作用。

除基因工程产品之外，我国在动植物细胞工程育种方面已产生了较好的经济和社会效益。两系杂交稻累计种植面积已达 200 亿 m^2（3 000 万亩），并已开始走向世界，仅东南亚国家目前的订单已超过 1 000 万 t；生物农药和生物肥料正迅速发展；传统的大宗发酵产品生产中存在的能耗高、物耗高、环境污染严重的情况已开始得到改善；我国的疾病诊断技术已经发生了重大变化。

我国应在某些有较好基础、接近或达到国际先进水平，或是有资源优势的技术领域，例如转基因动物反应器、转基因植物、功能基因组、生物芯片、组织工程、中药等领域选择部分重大项目，通过优势集成、整体设计、分段实施的方式，尽快将一批拥有自主知识产权的生物技术产品推向国际市场。

同时，通过采取财税、投融资、技术创新、知识产权、人才、市场环境培育、重点领域和关键环境改革等各方面的政策措施来促进生物功能材料产业的发展。在加大财税金融政策扶持方面，进一步强调建立稳定的财政投入增长机制，设立专项资金，完善税收政策和强化金融支持等各种手段。

大力发展生物技术中介组织。中介组织是创新体系的重要组成部分。我国应大力发展从事生物技术信息咨询、技术评估（包括生物安全性评估）、专利（特别是国外专利）代理、投融资等方面的中介机构。建议适时组建生物技术产业协会。政府主管部门可通过协会对全国的生物技术及产业发展进行组织协调。组建

生物技术产业协会有利于信息沟通和协作，有利于规范市场和公平竞争，亦可避免不必要的重复，有利于逐步形成社会化发展的格局。

加强生物技术产业相关技术及装备的产业化、国际化。目前我国尚不具备自主研制和生产并占有国际市场的能力，对重要的生物技术仪器、设备和装备，建议走与国外大公司合资合作的发展道路。在加速引进技术消化吸收的过程中，加强新型号、新设备的研制开发，逐步增强参与国际竞争的能力。

加强国际合作，建立战略联盟。我国在发展生物技术及产业的过程中，必须加强与国外政府和民间的合作与交流。同时，积极与某些大型跨国公司建立战略伙伴关系，鼓励和支持研究机构特别是企业在国外建立联合工作站。实践表明，这是实现技术跨越的有效途径。

5.2 我国生物功能材料科技与产业的战略布局

5.2.1 生物功能材料与上下游产业的协调发展模式

生物技术是一门综合性很强的技术。这一高技术产业的发展，不仅需要有上游的研究开发，而且需要有后续的工业生产与之相衔接。但是，在我国生物技术与产业的发展中，由于中间环节薄弱，上游与下游衔接不利的状况十分突出。上下游脱节，影响了生物技术成果的转化和生物技术及产业的进一步发展。

5.2.2 以政府引导和市场需求分布为基础的产业布局

进行战略布局，形成产业聚集区。建立国家生物技术重大项目孵化器。在目前我国资本市场尚不完善的条件下，孵化器的作用尤为重要，是解决生物技术产业发展中间环节薄弱的重要措施之一。为此，应在政策环境、技术基础较好的地区尽快建立 5 ～ 10 个生物技术国家重大项目的孵化器，配合具有自主知识产权、独特性的重大技术项目的实施，加速商品化、产业化进程。力争在 5 ～ 10 年内开发出一批具有自主知识产权和国际竞争力的重大生物技术产品，走出一条生物技术成果转化的成功之路。

在技术力量比较雄厚、投资环境好并已有一定生物技术产业基础的上海、北京、广东（深圳）、长春等地建立生物技术产业化基地，给予更优惠的财政和税收扶持政策，逐步形成 3 ～ 5 个生物技术产业聚集区，发挥高技术产业发展的聚集效应，尽快形成较大的生物技术产业规模。

参考文献

[1] 凤兆玄，戚国荣．医用高分子[M]．杭州：浙江大学出版社，1989．

[2] 谭英杰，梁玉蓉．生物医用高分子材料[J]．山西化工，2005，25（4）：17—19．

[3] 宋英攀，冯苗詹，红兵．石墨烯纳米复合材料在电化学生物传感器中的应用[J]．化学进展，2014，24（9）：1665—1672．

[4] Xu H F，Dai H，Chen G N．Direct electrochemistry and electrocatalysis of hemoglobin protein entrapped in graphene and chitosan composite film[J]．Talanta．2010，81（1/2）：334—338．

[5] Zhang J，Lei J P，Pan R，Xue Y D，et al．Biosens[J]．Bioelectron，2010，26（2）：371—376．

[6] Bo Y，Yang H Y，Hu Y，et al．A novel electrochemical DNA biosensor based on graphene and polyaniline nanowires[J]．Electrochim．Acta，2011，56（6）：2676—2681．

[7] Fomina N，Sankaranarayanan J，Almutairi A．Photochemical mechanisms of light—triggered release from nanocarriers [J]．Advanced drug delivery reviews，2012，64（11）：1005—1020．

[8] Wang Y，Han P，Xu H，et al．Photocontrolled self—assembly and disassembly of block ionomer complex vesicles：A facile approach toward supramolecular polymer nanocontainers [J]．Langmuir，2009，26（2）：709—715．

[9] Coelho P J，Castro M C R，Fonseca A M C，et al．Photoswitching in azo dyesbearing thienylpyrrole and benzothiazole heterocyclic systems [J]．Dyes and Pigments，2012，92（1）：745—748．

[10] Weingart O，Lan Z，Koslowski A，et al．Chiral pathways and periodic decay in cis—azobenzene photodynamics [J]．The Journal of Physical Chemistry Letters，2011，2（13）：1506—1509．

[11] Higuchi A，Hamamura A，Shindo Y，et al．Photon—modulated changes of cell attachments on poly（spiropyran—co—methyl methacrylate）membranes [J]．Biomacromolecules，2004，5（5）：1770—1174．

[12] Widder K J．Magnetic micorspheres：a vehicle forselective targeting of drugs[J]．Pharmacol Ther，1983，20（3）：337—395．

[13] 朱以华，王强斌，古宏晨，等．表面功能化磁性微球的制备及在核酸分离与固定化酶中的应用[J]．中国医学科学院学报，2002，24（2）：118—123．

[14] 洪霞，郭薇，李军，等．Fe_3O_4／葡聚糖／抗体磁性纳米生物探针的制备和层析检测[J]．高等学校化学学报，2004，25（3）：445—447，394．

[15]向娟娟,朱诗国,吕红斌,等.用氧化铁磁性纳米颗粒作为基因载体的研究[J].癌症,2001,20(10):1009—1014.

[16]Lendlein A, Langer R S. Self-expanding device for the gastrointestinal or urogenital area [P]. WO2004073690—A1, 2004.

[17]Marco D, Eckhouse S. Biodegradable self-inflating intragastric implants for curbing appetite [P]. WO2006092789-A2, 2006.

[18]Huang W M, Lee C W, Teo H P. Thermomechanical behavior of a polyurethane shape memory polymer foam [J]. J. Intelligent Mater. Systems Struct, 2006, 17 (8—9): 753—760.

[19]Kim J H, Kang T J, Yu W R. Simulation of mechanical behavior of temperature responsive braided stents made of shape memory polyurethanes [J]. J. Biomechi., 2010, 43 (4): 632—643.

[20]Eliades T. Orthodontic materials research and applications: Part 2. Current status and projected future developments in materials and biocompatibility [J]. Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop, 2007, 131 (2): 253—262.

[21]Meng W, Xing Z C, Jung K H, et al. Synthesis of gelatin-containing PHBV nanofiber mats for biomedical application [J]. J. Mater. Sci. Mater. Med., 2008, 19 (8): 2799—2807.

[22]Kallmes D F, Fujiwara N H. New expandable hydrogel-platinum coil hybrid device for aneurysm embolization [J]. Am. J. Neuroradiol, 2002, 23 (9): 1580—1588.

[23]Ahuja A A, Hergenrother R W, Strother C M, et al. Platinum coil coatings to increase thrombogenicity: a preliminary study in rabbits [J]. AJNR. Am. J. Neuroradiol, 1993, 14(4): 794—798.

[24]Gu Z Z, Uetsuka H, Takahashi K, et al. Structural color and the lotus effect[J]. Angew Chem Int Ed, 2003, 42: 894—897.

[25]Xia F, Guo W, Mao Y D, et al. Gating of single synthetic nanopores by proton—driven DNA molecular motors[J]. J Am Chem Soc, 2008, 130: 8345—8350.

[26]Dalton A B, Collins S, Munoz E, et al. Super-tough carbon-nanotube fibres—These extraordinary composite fibres can be woven into electronic textiles[J]. Nature, 2003, 423: 703.

[27]Feng L, Li S H, Li Y S, et al. Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial [J]. Adv Mater, 2002, 14: 1857—1860.

[28]Gao X F, Jiang L. Water—repellent legs of water striders[J]. Nature, 2004, 432: 36.

[29] Ge L, Sethi S, Ci L, et al. Carbon nanotube—based synthetic gecko tapes[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 10792—10795.

[30] 马顺. 促进战略性新兴产业发展的财政政策研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2012.

[31] 付玉斌. 生物功能材料的发展和应用[J]. 材料开发与应用，1995（5）：40—43.

[32] 赛迪顾问开发区研究中心. 中国生物医药产业地图白皮书[R]. 2010.

[33] 生物谷. 中国 22 个国家生物产业基地概况[R]. 2009.

[34] 李建秀，俞镇慌. 完全生物降解材料的应用及发展趋势[J]. 产业用纺织品，2003(9): 1—4.

[35] 代丽. 2007 年 3 月 16—31 日国内外科技要闻[J]. 科技导报，2007（7）：80.

[36] 中国林业网. 第八次全国森林资源清查主要结果（2009—2013 年）[OL]. http：//forestry.gov.cn.

[37] 陆亚洲. 我国自然资源利用现状和对策[J]. 自然资源，1994（6）：1—8.

[38] 张尔贤，俞丽君. 海洋生物活性物质开发利用的现状与前景[J]. 台湾海峡，2000，19（3）：388—395.

[39] 郝刚. 齿科用镍铬合金材料的生物安全性能[J]. 中国组织工程研究，2013（8）：1461—1464.

[40] 李婧，杨海林，阮建明，等. 浸渍法制备多孔镍钛生物材料及性能[J]. 稀有金属材料与工程，2013，42（5）：1023—1027.

[41] 胡喜兰，施鹏飞，姜琴，等. 钴配合物的合成、晶体结构与抗微生物活性[J]. 无机化学学报，2009，25（2）：373—376.

[42] 尹德帅，许兴友，陈智栋，等. 新型 Co（Ⅱ）配合物的合成，结构和抑菌性能研究[J]. 人工晶体学报，2009，38（4）：1037—1041，1045.

[43] 刘艳，贺志荣，王芳，等. Ti—50.8Ni 合金的相变、形状记忆与超弹性特性[J]. 稀有金属材料与工程，2011，40（8）：1412—1416.

[44] 王璐，田金环，等. 功能化稀土高分子材料及其在生物医学中的应用[D/OL]. 中国科技论文在线. http://www.paper.edu.cn.

[45] 中国选矿技术网. 2013 年中国有色金属矿产资源特点分析[OL]. http://www.mining120.com.

[46] 安茂春，王志健. 国外技术成熟度评价方法及其应用[J]. 评价与管理，2008（2）：1—3，21.

[47] 杨海生，陈少凌，罗党论，等. 政策不稳定性与经济增长——来自中国地方官员变更的经验证据[J]. 管理世界，2014（9）：13—28，187—188.

第 6 篇

土木工程功能材料

功能材料的概念是由美国贝尔实验室 J. A. Morton 于 1965 年最初提出，20 世纪 70 年代经过日本材料科技界广泛深入的研讨而确立；20 世纪 80 年代在我国被接受，并于此后日益受到科技界与产业界的广泛关注与高度重视。功能材料种类繁多，用途广泛，已形成一个规模宏大的高新技术产业群，具有十分广阔的市场前景和极为重要的战略意义。功能材料是新材料领域的重要组成部分，是国民经济和社会发展以及国防建设的基础和先导。世界各国均高度重视功能材料的研发与应用，其已成为世界各国新材料研究发展的热点和重点，也是世界各国高技术发展战略中竞争的焦点。新材料技术被称为“发明之母”“产业粮食”和“科技发展的骨肉”，在全球新材料研究领域中，功能材料约占 85%。功能材料不仅对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，还对我国相关传统产业的改造和升级，实现跨越式和可持续发展起着重要的促进作用。

土木工程，英语为 Civil Engineering，直译是民用工程，它的原意是与军事工程（Military Engineering）相对应的，即除了服务于战争的工程设计以外，所有服务于生活和生产需要的民用设施均属于土木工程。后来这个界限也被打破，现已把军用的战壕、掩体、碉堡、浮桥、防空洞等防护工程也归入土木工程的范畴。土木工程材料是用于土木工程建设中的所有材料。社会发展和科技进步，不仅要求土木工程材料具有坚固耐久的基本结构特性，还要求其具有耐火、防水、隔热等（多）功能特性。目前，土木工程功能材料已成为土木工程材料的一个重要分支，并占有越来越大的比例。特别是近些年来，材料科学、计算机技术及其他基础科学出色的研究成果使土木工程功能材料的全面更新与发展具备了前所未有的可能性，整个土木工程功能材料的技术构成和研究内涵均发生了根本性的变化。另外，土木工程材料应用量大面广，使得土木工程功能材料在整个功能材料领域也占据举足轻重的地位。

土木工程功能材料是指以材料的力学性能以外的功能为特征的材料。它以利用材料的力、电、光、声、热、磁、电磁性质及其交互作用为主，赋予土木工程结构绝热、隔声、采光、防水、密封、防火、装饰等功能。本部分将全面系统地

介绍土木工程功能材料的定义、分类、研究发展以及产业状态。其中第 1 章至第 7 章介绍 7 种传统、发展成熟的土木工程材料，包括热、声、光、防火、防水、密封和装饰功能材料；第 8 章至第 10 章介绍近些年来得到长足发展的新型土木工程功能材料，包括力、电、磁、电磁功能土木工程材料；第 11 章和第 12 章介绍具有极具发展潜力的两类土木工程功能材料 —— 智能土木工程功能材料和纳米土木工程功能材料。

第 1 章　热功能土木工程材料

热功能土木工程材料的主要作用是改善或调节土木工程结构物或构造物的热使用环境，主要包括绝热材料和相变储能材料。

1.1　绝热材料

1.1.1　绝热材料的定义及分类

绝热材料，又称保温隔热材料，是指对热流具有显著阻抗性的材料或材料复合体。习惯上把用于控制室内热量外流的材料称为保温材料，把防止室外热量进入室内的材料称为隔热材料。工程上，将导热系数 λ 小于 0.20W/(m • K) 的材料统称为绝热材料。该材料选用时，除应考虑导热系数外，还应考虑材料的吸水率、燃烧性能、强度等指标。

按材质可将绝热材料分为有机、无机和金属绝热材料三类。无机绝热材料具有不腐烂、不燃烧、耐高温、防火性好、使用寿命长等优良特性，但保温性差、容重大、机械强度低，多用于包裹热力设备及管道，如矿（岩）棉、玻璃棉、硅藻土、膨胀珍珠岩、泡沫玻璃及其制品、膨胀蛭石及其制品、加气混凝土、硅酸铝纤维及其制品、硅酸钙制品等。有机绝热材料保温性能好、可加工性强、质轻，但易燃、耐久性差、不环保，多用于低温保冷，包括聚苯乙烯泡沫塑料、聚氯乙烯泡沫塑料、聚氨酯泡沫塑料、酚醛树脂泡沫塑料、脲醛树脂泡沫制品、软木等。金属绝热材料体轻、防潮性能好，主要用于夹层墙体或屋面的保温隔热，如锡箔、铝箔、闭孔型泡沫铝等。常用无机绝热材料的种类及特性如表 6-1-1 所示。

表 6-1-1　常用无机绝热材料的种类及特性

无机绝热材料种类	导热系数 W/（m·K）	容重 kg/m^3	吸水率	耐久性
矿渣棉	0.044 ～ 0.049	44 ～ 150	大	特长
岩棉	0.029 ～ 0.046	50 ～ 200	大	特长
膨胀珍珠岩	—	—	较大	较长
膨胀蛭石	0.046 ～ 0.070	—	较大	较长
炉渣	—	—	小	长
玻璃棉	0.035 ～ 0.041	45 ～ 150	较大	长
泡沫玻璃	0.042 ～ 0.048	150 ～ 200	小	长
泡沫混凝土	0.060 ～ 0. 280	300 ～ 1 600	小	长

按形态可将绝热材料分为多孔状、纤维状、松散粒片状及粉末状、致密结构绝热材料四种。多孔状绝热材料包括泡沫塑料、泡沫橡胶、泡沫玻璃、泡沫混凝土等，具有质量轻、绝热性能好、弹性好、尺寸稳定等优点，但耐稳性差；纤维状绝热材料包括有机、无机、金属和复合纤维等，其中无机纤维主要用于工业领域；松散粒片状及粉末状绝热材料包括硅藻土、膨胀珍珠岩等，其原料来源丰富、价格便宜，是土木工程中较常用的高效绝热材料；致密结构绝热材料包括铝箔、锡箔、热反射玻璃等。

多孔状、纤维状和松散多层绝热材料一方面依靠材料表面的反射阻抗热流，另一方面依靠材料孔隙或夹层中密闭空气的低导热率阻抗热流。外墙隔热涂料对太阳光中的可见光和近红外光具有较高的反射能力，且可通过辐射的形式把建筑物吸收的热量以一定的波长发射到空气中，从而达到良好的隔热降温效果。

按绝热机理的不同，可将绝热材料分为热阻隔型、太阳光反射型和红外辐射型。热阻隔型绝热材料主要是指传统的保温材料，大量应用于建筑外墙外保温系统，通过对热传导的阻抗来阻碍热量的传递，导热系数越小，隔热性能越好，包括有机高聚物泡沫材料和无机矿物材料两大类。太阳光反射型绝热材料主要是指太阳光反射性隔热涂料，通过向常用水性墙体涂料中掺加反射性填料制成，反射率高、隔热性能较好的填料有金红石型 TiO_2、铝粉和中空微珠等。红外辐射型绝热材料是把吸收的热量以 8 ～ 13.59 μm 的远红外线形式发射出去，从而达到降温目的的一类主动隔热型材料。与热阻隔型和反射型绝热材料相比，红外辐射型绝热材料的效率更高，但该材料在我国尚处于起步阶段，目前应用较多的红外辐射填料主要是红外辐射陶瓷粉。

绝热材料常以松散材、卷材、板材和预制块等形式用于土木工程中，可直接砌筑（如加气混凝土）使用，也可放在建筑物屋顶及围护结构中作芯材，或铺垫成地面保温层；纤维或粒状绝热材料既能填充于墙内，也能喷涂于墙面等处，兼有绝热、吸声、装饰和耐火等效果。

1.1.2 绝热材料的应用与研究现状

1. 绝热材料的应用现状

20 世纪 80 年代，我国绝热材料开始获得较快的发展和广泛的应用，现已拥有品种较为齐全、初具规模的绝热材料体系和技术。

土木工程中，绝热材料主要用于屋面、墙体等建筑围护结构的保温隔热，其中以外墙外保温系统的发展最为迅速。外墙外保温系统起源于 20 世纪 60 年代的欧洲，70 年代初得到重视和发展。目前，欧洲国家广泛使用的外墙外保温系统是外贴阻燃型的膨胀聚苯板或不燃型岩棉板薄抹灰体系，均以涂料为外饰层。20 世纪 70 年代，美国从欧洲引入该项技术，实际工程中使用较多的体系是轻钢结构骨架内填绝热材料。

我国外墙外保温系统常用绝热材料的导热系数性能指标、防火等级对比如表 6-1-2 所示。

表 6-1-2 外墙外保温系统常用绝热材料的导热系数性能指标、防火等级对比

绝热材料	导热系数 W/(m·K)	防火等级	备注
XPS	≤ 0.03	B2	防火等级低
EPS	≤ 0.041	B2	防火等级低
PU	≤ 0.024	B2	防火等级低，单价较高
PF	0.025 ～ 0.03	B1	易粉化、施工不便
岩棉板	0.045 ～ 0.05	A	抗拉强度低，耐久性较差
玻化微珠保温砂浆	≤ 0.07	A	导热系数偏高
胶粉聚苯颗粒保温砂浆	≤ 0.059	B1	导热系数偏高

其中应用量最大的是 EPS 和 XPS，约占 80%，该类材料价格低、保温性能好、吸水率低、质量轻、施工方便，但属于 B2 级可燃材料，防火等级低，用于高层建筑时存在安全隐患，国外已明文禁止将其用于高层建筑的保温隔热，需加入阻燃剂对其进行特殊处理。与国外市场相比，PF、PU 等硬质泡沫类绝热材料在我国应用较少。PU 经特殊处理后属于 B1 级难燃材料，保温隔热效果是 EPS 和

XPS 的 1.75 倍、岩（矿）棉的 2 倍、砖石的 29 倍、木材的 85 倍、混凝土的 89 倍。欧美发达国家建筑节能保温中的 PU 材料占有率达 50%，日韩地区的建筑节能保温也以 PU 为主，日本的住宅、高层框架结构的建筑保温中 PU 占有率达 80%，但我国 PU 保温材料的使用率还不到 10%。PF 耐燃性好、发烟量低、高温性能稳定、绝热、隔声、易成型加工，被称为第三代新兴绝热材料，但生产成本高，生产过程污染环境，特别适用于对防火要求严格的场合，已在欧美日等发达国家广泛使用，我国大中城市也在流行。岩（矿）棉是目前土木工程用绝热材料中能够达到 A 级不燃防火标准的最佳首选材料，在国外已经具有成熟的应用技术，但我国主要将其用于蒸汽管道和炉墙的保温。玻璃棉及其制品保温性能好、防火等级高，是理想的工程用绝热材料，北美发达国家已在土木工程中大量使用，我国则更多地将其用于工业建筑和钢结构建筑。

20 世纪 70 年代，美国、英国、日本等国家开始研究太阳光反射隔热涂料，因经济、使用方便和隔热效果好等优点，受到人们的青睐，发展前景光明。2012 年，上海某公司开发出 80 型和 90 型系列反射隔热涂料，能有效地将保温层的厚度减薄 1 ～ 2cm。

2. 绝热材料的研究与发展现状

绝热材料不但需要具有良好的保温隔热效果，还需具有一定的防火能力。国外对绝热材料的防火等级要求严格：美国早已有 20 多个州禁止使用 EPS；英国不允许 18m 以上建筑使用 EPS 板薄抹灰外墙保温系统；德国明确规定，超过 22m 的建筑严禁使用有机可燃保温材料（如 EPS 等）；瑞典及芬兰等西欧国家将 80% 以上的岩棉制品用于建筑节能；日本政府出台法规，要求将耐热性能好、燃烧后发烟量低的 PF 作为公共建筑的标准耐燃物，耐燃烧性能低于 PF 的，不允许在公共建筑上使用。而我国目前仅在“水立方”、北京地铁等一类公共建筑施工中使用 PF。一般情况下，有机绝热材料的节能效果好，但阻燃性相对较低；无机绝热材料的防火性能好，但导热系数较大。目前，绝热能力和阻燃效果均较好的材料已开始应用到实际工程中，如泡沫玻璃、泡沫水泥、石材蜂窝板（表面为两层大理石，内夹蜂窝状铝材）等。此外，目前还处于研究及初步运用阶段的几种新型绝热材料发展态势如下。

（1）纳米孔气凝胶超级绝热材料的研究不断走向实用化和工业化 1992 年，美国学者 Hunt 等在国际材料工程大会上提出超级绝热材料的概念，包括真空绝热材料和纳米孔超级绝热材料两种。纳米孔超级绝热材料内绝大多数的孔隙都在

100nm 以下，80% 以上的气孔尺寸小于 50nm，材料的体积密度低，在常温和设定的使用温度下，具有比无对流空气更低的导热系数。气凝胶（Aerogol）通常是指纳米量级超微颗粒相互聚集构成纳米多孔网络结构，并在网络孔隙中充满气态分散介质的轻质纳米孔超级绝热材料，密度低且热导率极小，是一种较为理想的轻质、高效绝热材料。国内外报道中常见的有 SiO_2 气凝胶、ZrO_2 气凝胶、Al_2O_3 气凝胶、Si-C-O 气凝胶等。纳米孔 SiO_2 气凝胶的研究最为广泛，其密度可低达 $3kg/m^3$，孔洞率高达 99 %，纤细的纳米多孔网络使其具有优异的保温隔热性能。

瑞士和德国采用气凝胶设计了透明玻璃墙体，能够有效积累太阳能热量并防止热量散失；美国 Cabot 公司与 Kawall 公司共同开发了 SiO_2 气凝胶夹芯板，透光率达到 20%，热导率仅为 0.05W/(m·K)；美国 Aspen 公司将气凝胶与纤维等增强体复合制备出柔性气凝胶隔热毡；美国国家宇航局（NASA）Ames 研究中心开发了陶瓷纤维－气凝胶复合隔热瓦，与原隔热瓦相比，隔热性能提高 10～100 倍，且强度大大提高。

（2）发泡水泥应用前景较好　发泡水泥是通过在水泥浆中充气形成的轻质发泡保温材料，1975 年由美国的 Aldrish 和 Mitchell 提出，最早应用在油田固井的施工工艺中，随着发泡和稳泡技术的发展，逐渐被用于土木工程中。与有机绝热材料相比，作为无机不燃材料的发泡水泥导热系数大，但耐火性好、与结构层的附着性强、施工后表面平整。发泡水泥外墙保温装饰一体板可将装饰和保温施工合二为一，节约了近十道工序，大大节约了施工时间，相对于传统保温方法，缩短 60% 的工期，且可产生低碳节能、装饰、防水、防霉、防火与建筑一体的效果。以发泡水泥为芯材，钢或预应力混凝土为边框，上下表面涂布玻纤网水泥面层复合而成的太空板，在起到保温隔热作用的同时，还具有承重、隔声、防火等优良性能，属于新型节能、绿色、环保型建筑板材。

（3）复合硅酸盐保温材料应用量逐渐增大　该种材料具有可塑性强、导热系数低、耐高温等优点，主要种类有硅酸镁、硅镁铝、稀土复合保温材料等。海泡石复合硅酸盐绝热材料具有良好的保温隔热性能和应用效果，显示出强大的市场竞争力和广阔的市场前景；美国的 Carborudum 公司制造出厚度达 0.8mm 的硅酸铝纤维纸；我国学者以硅酸铝纤维纸和石英纤维网为基体材料，高温粘结剂为间隔层，疏水性 SiO_2 气凝胶为隔热填料，采用粘结工艺制备出新型的复合高温隔热材料。

（4）重视反射隔热保温涂料的研究与开发　我国保温涂料起步较晚，经过十几年的研制和开发，国产保温涂料已经占有一定的市场份额，打破了国外品牌的垄断。水性无机隔热保温涂料以其优异的绝热性能和良好的环保效果，成为今后保温涂料的主要发展方向。纳米粉末因具有独特的热能吸收和发射功能，成为隔热保温涂料应用的新热点，也为高性能、薄涂层保温涂料的研制和生产创造了新的机遇。我国研究人员在传统水性涂料配方的基础上加入高反射率的玻化微珠和超细 TiO_2 组成高反射率复合填料，同时加入红外辐射型复合功能填料，制得高反射和高辐射为主、传统隔热为辅的新型水性隔热涂料。

（5）绿色多功能绝热材料不断涌现　杨久俊等研制了免烧粉煤灰微珠隔热砖；税安泽等利用抛光砖废料、高温砂、低温砂及各种黏土为原料，研制了以闭口气孔为主兼具保温隔热功能的新型轻质建筑材料；开发以植物纤维为主要原料的绿色环保材料，将是绝热材料的发展趋势。

2014 年，斯德哥尔摩大学的伦纳特·斯多姆等将纳米纤维素、石墨烯氧化物和黏土纳米材料混在一起成功制备出具有良好机械强度、防潮性和阻燃性的超绝缘泡沫材料。该材料的热导率比 EPS 和 PU 都低，且不需要浸渍于有机阻燃剂，同时还能承受相当大的负载，可以安装在旧建筑物中而不影响建筑设计。与气凝胶相比，该材料强度更好，导热系数更低，且具有阻燃特性。

以上介绍了五类极具发展潜力的绝热材料。总体上，我国绝热材料的发展趋势体现在以下几个方面：

（1）对现有产品及技术进行改进提高　如 PU 泡沫塑料向无氟利昂发泡及提高耐温性方向发展；硅酸盐复合绝热涂料向快速固化、憎水、提高粘结强度、降低密度、负温施工及降低成本方向发展；硅酸钙绝热材料向超轻全憎水方向发展；珍珠岩制品向轻质、防水、高强方向发展；玻璃棉、岩矿棉向复合制品及用于节能方向发展；硅酸铝纤维向提高耐火度、降低高温收缩率及复合制品方向发展等。

（2）发展绝热及防火性能均良好的新型材料及结构　推广使用硬质交联发泡聚氯乙烯（PVC）、岩棉、矿棉等阻燃型墙体绝热材料；推广应用低辐射中空玻璃；着重研发纳米 SiO_2 气凝胶，并对其进行增强和增韧处理；注重研制低辐射传热材料、高效薄层隔热防腐一体化涂料、真空绝热结构等新材料；有针对性地研制价廉适用的外护材料，提高整体节能效益，如复合隔热外护涂层、复合增强塑料布、仿金属材料等。

（3）研制多功能复合绝热材料　将硅酸铝纤维与岩矿棉复合使用，改善硅酸铝纤维的抗温性，降低成本；将超轻憎水硅酸钙、憎水珍珠岩与绝热涂料及复合硅酸盐型材等复合使用，可改善超轻憎水硅酸钙、憎水珍珠岩的施工性能；外墙喷涂聚合物绝热砂浆，可在绝热的同时起到自然装饰效果。

（4）逐步开发纳米、亚纳米绝热材料及涂层技术　通过特定的均匀分散技术将纳米材料分散到特定载体（添加剂、外掺料、防水剂或其他助剂）中，以获得强度高，耐磨性、热绝缘性、耐温性及憎水性优良的绝热材料。

1.1.3　绝热材料产业现状

《新材料产业“十二五”发展规划》指出，“十二五”期间我国保温材料产值将达 1 200 亿元 / 年，主要推广高效阻燃安全保温隔热材料、新型墙体材料、超薄型陶瓷板（砖）等，提高建筑材料抗震防火和隔声隔热性能。2012 年我国绝热材料产品类型的分布情况（按产量计）如图 6-1-1 所示。其中，纤维类绝热制品主要包括矿（岩）棉纤维、玻璃棉纤维、硅酸铝纤维类产品等，硬质类绝热制品主要包括硅酸钙、泡沫玻璃、膨胀珍珠岩、膨胀蛭石等板材类产品，有机类绝热制品主要包括 EPS、XPS、聚乙烯（PE）泡沫塑料、PVC、PU、PF、海绵橡塑保温材料等。

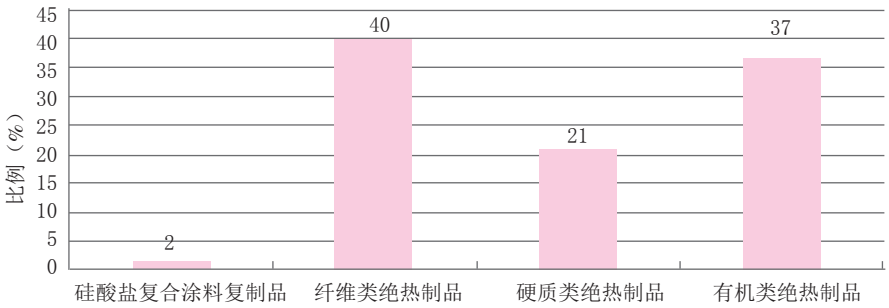


图 6-1-1　2012 年我国绝热材料产品分布情况（按产量计）

近年来，硬质类绝热制品中水泥泡沫硅钙类材料所占比例逐年增长；国家对粉煤灰、废旧泡沫塑料等废弃物在绝热领域的应用加大了政策扶持力度，以废旧泡沫塑料为原料的绝热材料有较大的价格优势；国内外纷纷展开薄层隔热保温涂料的研究，北京志盛威华科技发展有限公司已率先研制成功高效、薄层、绝热节能、装饰防水于一体的新型太空反射绝热涂料。

阻燃 PU/ 无机复合材料是目前最理想的绝热材料，以阻燃 B1（或 B2）级 PU 为芯材、耐碱水泥基玻纤网格布或轻质水泥砂浆为面层构成，导热系数为

0.020 ～ 0.024W/(m · K)，防火安全性可达 A 级，与水泥砂浆基层之间的相容性好、粘接强度大，现场施工方便，施工效率高。目前我国已有 300 条左右的阻燃 A 级 PU/ 无机复合绝热材料生产线，年产能达到 3 亿～ 4 亿 m^2。该复合材料已在北京老旧房改造和新建建筑、南京保障房建设中得到大批量使用，成为绿色建筑外墙建设的首选材料。江苏绿源新材料有限公司、烟台万华聚氨酯有限公司和雅达建筑新材料（上海）有限公司是生产该种绝热材料的主要企业。

我国生产规模达到万吨级、万平方米级的绝热材料企业已发展到百余家，品牌意识不断加强，如北新建材集团的“龙”牌矿棉装饰吸声板、北京星牌建材有限公司的“星”牌矿棉装饰吸声板、山东鲁阳股份有限公司的“鲁阳”牌绝热用硅酸铝纤维及其制品分别获得中国名牌产品称号；岩棉生产线、酚醛生产线的研制取得了突破性的进展；在国外有几十年成功应用经验的不燃纤维类绝热材料和体系得到了国家产业政策的重点支持；复合型、预制型、保温装饰一体化多功能绝热材料及制品市场前景良好。但我国绝热材料行业存在技术水平低、产品种类少及产品档次低的现状。“十二五”期间，绝热节能材料全行业要淘汰落后产能 50 万 t 以上，其中重点淘汰对环境污染严重、生产能耗高的小岩棉生产线、小硅酸铝生产线；重点支持 3 万 t 以上的岩矿棉机械装备、热熔渣法矿棉生产线、大型 PF 生产设备的研发和产业化项目。2014 年 7 月，四川省科技支撑计划项目“新型绿色高性能三聚氰胺系列泡沫塑料的研制”通过专家组验收。三聚氰胺泡沫塑料密度低、燃点高、耐湿热稳定性好，且具有良好的隔热、吸声降噪等性能，可作为土木工程绝热功能材料着重推广。

1.2 相变储能材料

1.2.1 相变储能材料的定义及分类

相变储能材料（Phase Change Materials，PCMs）是指在一定的温度范围内，可利用材料本身相态或结构的变化从环境吸收热量或向环境放出热量，从而达到热量储存和释放目的的材料。PCMs 一般须满足以下要求：储能密度大；能源转换效率高；稳定性好；单组分材料应不易挥发和分解；多组分材料的各组分间应结合牢固，不会发生离析现象；无毒、无腐蚀、不易燃易爆，价格低廉；导热系数大，可以及时地储存或释放能量；不同状态间转化时，材料体积变化要小。用于建筑领域的 PCMs，相变温度应接近人体的舒适温度，应具有足够大的相变潜热和热传导系数，且相变可逆性好，过冷或过热现象小。

现已发现的 PCMs 在 6 000 种以上。相变储能材料的分类如图 6-1-2 所示。

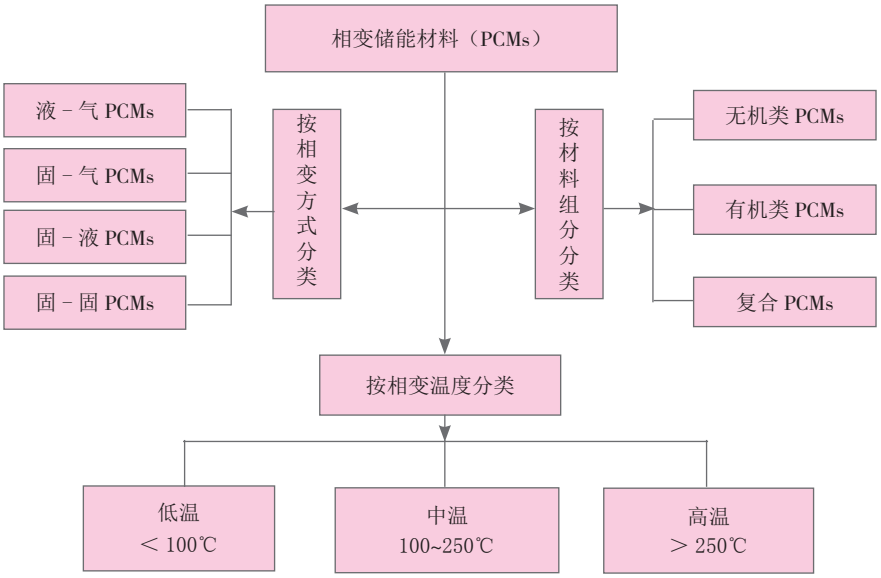


图 6-1-2　相变储能材料的分类

由于固－气、液－气 PCMs 在相变过程中产生大量气体，体积难以控制，实际应用较为困难。固－液 PCMs 价廉易得，相变温度低，尤其适用于建筑节能领域，但其相变潜热较低，且当相变材料处于液态时，易产生泄露，污染环境，需要采取一定的制备方法封装材料。固－液 PCMs 与传统土木工程材料的复合方式主要有：浸渗法、直接混合法、多孔基材料吸附法、定形 PCMs 等。浸渗法和直接混合法都无法避免固－液 PCMs 的渗漏。多孔基材料吸附法是利用多孔材料（石膏板、木板、混凝土、水泥纤维板、粉煤灰空心球等）的毛细孔效应，对相变材料实施有效封装，我国学者已经研制出硅藻土、木材、泡沫石墨等多孔材料基体的石蜡 PCMs。定形 PCMs 主要是指微胶囊法。微胶囊法是指在相变材料表面包覆一层高分子膜，制得以相变材料（以石蜡为主）为芯材，以高分子聚合物如聚乳酸、聚烯烃、PF 等为壁材的微胶囊 PCMs，可有效避免相变芯材在工程构件中发生渗漏。

无机类 PCMs 属于中低温相变材料，种类繁多，主要有结晶水合盐、熔融盐等，具有代表性的有 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$、$MgCl_2 \cdot 6H_2O$、$CaCl_2 \cdot 6H_2O$，储热密度大、导热系数高、相变体积小、价格便宜，但存在过冷度大，易产生相分离，老化变质，水合盐具有腐蚀性不利于封装等缺点。有机类 PCMs 目前使用最多的是石蜡。

有机类 PCMs 固体成型性好，不易发生相分离及过冷现象，腐蚀性较小，性能稳定，但导热系数小、密度小、易挥发、易燃，相变时体积变化大，可加入铝粉、铜粉等导热系数高的金属粉末改善其性能。土木工程常用相变材料如表 6-1-3 所示。

表 6-1-3　土木工程常用相变材料

常用相变材料	相变温度（℃）	相变焓（J/g）
石蜡 C16~C18	17~22	240
硬脂酸丁酯	22	140
六水氯化钙	29	180
四水氟化钾	19	230
60% 石蜡 +40% 硬脂酸丁酯	25	112
50% 癸酸 +50% 月桂酸	25	109

1.2.2　相变储能材料的研究与应用现状

PCMs 应用于土木工程材料的研究始于 1982 年，由美国能源部太阳能公司发起；90 年代，PCMs 开始被用来处理石膏板、墙板及混凝土构件等。美国的 Telkes 对十水硫酸钠进行了长期研究，并建造了第一座 PCMs 被动太阳房；德国西门子公司对多孔陶瓷材料中填充 PCMs 用于高温储热的技术进行了研究。1999 年，国外开始在墙板或轻型混凝土预制板、地板中使用 PCMs，以使室内保持适宜的温度；并开始研制含有 PCMs 的沥青或水泥路面，以防止道路、桥梁、飞机跑道等在冬季深夜结冰。

我国在 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始对 PCMs 进行研究。清华大学在相变材料的研制、相变墙体的物理 / 化学性能测试等方面开展了大量的研究；邓安仲等采用溶胶 - 凝胶法分别制备了相变石膏砂浆和轻质相变储热墙体材料；尚建丽等选择了几种脂肪酸，依据二元低共熔原理，制备出适合节能建筑围护结构使用的二元有机相变储能材料。我国在 PCMs 实际应用方面也取得了很大进展。室温 PCMs 可以用来减小房屋的温度波动，从而降低空调负荷，实现建筑节能；50 ～ 60℃的 PCMs 可用作被动太阳能房的储热墙或储热地板；高温相变材料则主要用于工业余热回收，进而将余热用于建筑节能领域。

PCMs 通常与传统土木工程材料复合使用，制成如相变储能墙板、相变储能混凝土、建筑保温隔热材料、相变储能砂浆、相变储能地板等。20 世纪 80 年代中期，美国开始研究含有 PCMs 的相变储能墙板，其蓄热能力可在采暖设备或空调关闭之后相当长一段时间内使房间温度保持在人体感觉舒适的温度范围内，还可以在较短时间内快速储存和释放大量的热。研究表明：5cm 厚 PCMs 墙板的热效果相当于 23cm 厚的混凝土墙板。美国 Florida 科技大学分别用脂肪酸、短链酸和甲基脂的混合物作为相变材料，用灰泥板作基材，通过直接浸泡法制备出相变储能墙板。试验结果表明：当建筑物室内外温度变化在 11.1℃以上时，该种相变墙板的贮热能力是普通墙板的 2.1 倍。Peippo 等使用含有相变材料的塑料板建造了 120m^2 的试验房，1 年能够节约 15% 的热消耗量。Salyer 的研究表明：用含 30% 商业级石蜡的相变石膏板搭建的房子，室内最高温度比普通房子低大约 10℃。王岐东等分别将硬脂酸丁酯和相变石蜡在聚乙烯醇的分散作用下直接加入石膏板中，制备的相变储能石膏板储能能力是普通石膏板的 10 倍，吸水性能仅为普通石膏板的 1/3。PCMs 经微胶囊技术处理后制成石膏板墙体，如图 6-1-3 所示。

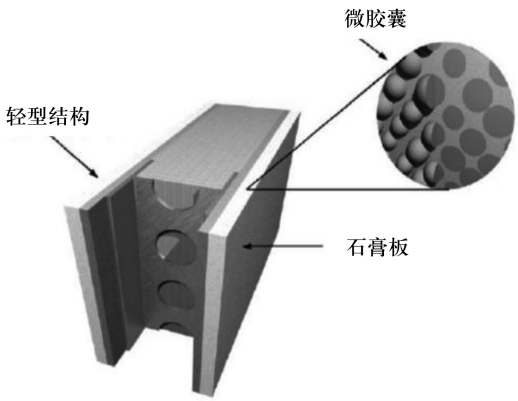


图 6-1-3　微胶囊相变复合石膏墙板

相变储能混凝土是以混凝土为基体的复合相变智能混凝土，PCMs 的加入有利于控制混凝土的水化热，有效防治混凝土的早期热裂缝，改善混凝土的防水性和耐久性。已有研究表明：在混凝土中掺入微胶囊 PCMs 可使混凝土表面最高温度降低（16±2%）℃，最低温度增加（7±3%）℃；在混凝土浇筑过程中掺入 PCMs，可降低大体积混凝土的最高绝热温升值和升降温速度，防止大体积混凝土温度裂缝的出现。我国学者将硬脂酸丁酯吸附到活性炭中制成相变储能骨料，

替代部分骨料（卵石）制成相变储能混凝土，显著提高其储热能力；利用储能密度大、相变过程等温或近似等温的 PCMs 可开发出用于水工大体积混凝土结构的相变温控混凝土。

绝热材料中掺入 PCMs 制备高效节能绝热材料，在土木工程材料领域中得到广泛重视。1999 年，美国俄亥俄州戴顿大学研究所研制出能在隔热墙板或者轻型混凝土板中浇筑的固－液共晶相变材料，可以保持室内温度适宜；王智宇等以膨胀珍珠岩为吸附载体，以质量分数 70% 的乳化石蜡制成纤维增强相变储能保温建筑材料，温度在 20 ～ 30℃波动时，比热容比空白板材高近 4 倍，蓄热系数比空白板材高 60%，导热系数保持在 0.105W/(m · K)。武汉理工大学和武汉奥捷新型建材有限公司通过在绝热材料基体中掺入少量 PCMs，成功制备了用于节能建筑外围护结构的高效节能型建筑绝热围护材料。

德国 BASF 公司对石蜡进行微粒封装后研制出了相变石蜡砂浆，已应用于建筑内隔墙，平均每平方米墙面含有 750 ～ 1 500 g 的石蜡，每 2cm 厚的石蜡砂浆蓄热能力相当于 20cm 厚的砖木结构墙。德国弗赖堡夫朗费太阳能系统研究所通过在水泥中加入装有石蜡的微胶囊研制出一种冬暖夏凉的内墙砂浆，3cm 厚的砂浆热容量相当于 40cm 厚的水泥墙体。

用含相变材料的微胶囊制备涂料，或用多孔超细材料复合 PCMs 填充涂料，可提升建筑物的储热能力。中国建筑材料科学研究院与北京首创纳米科技有限公司利用多孔超细 SiO_2 复合 PCMs 作为隔热涂料的主要填充介质，联合开发出低成本、高隔热性的涂料。已有研究表明：利用 PCMs 制成的电加热蓄热地板系统，可使房间 57% 左右的用热量从用电高峰期转移到用电低谷期。清华大学超低能耗示范楼工程中将相变温度为 20 ～ 22℃的定形 PCMs 放置于常规的活动地板内制成相变蓄热活动地板，可保证室内温度波动不超过 6℃。 相关研究表明：轻型建筑的 PCMs 天花板储热能力高达 1 080kJ/m^2，相变天花板厚度可减小到 5cm。

土木工程用 PCMs 尚处于初步应用阶段，有很多实际问题亟待解决，如 PCMs 与基体（石膏或水泥试块）的相容性问题、微胶囊封装工艺的成本问题、PCMs 稳定性与耐久性等问题。在未来一段时间，土木工程用 PCMs 的发展主要集中在以下几个方面：一是通过对单一 PCMs 的改性或对复合相变储能材料的研究，开发出满足土木工程应用的、具有适宜相变温度和相变潜热较大的 PCMs；二是探索 PCMs 与普通土木工程材料的结合形式，开发出性价比更高的相变储能

土木工程材料；三是改善相变材料的导热性能，提高 PCMs 与基体的相容性及混合后材料的热物性能和力学性能。

1.2.3 相变储能材料的产业现状

国外对 PCMs 的开发，已进入实用阶段，主要用来控制反应的温度、利用太阳能及储存工业反应中的余热和废热等。美国管道系统公司应用 $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ 作为 PCMs 制成贮热管，用来贮存太阳能和回收工业中的余热，100 根长 15cm、直径 9cm 的 PE 贮热管能满足一个家庭所有房间的取暖需要。日本专利报道，用 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$、$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$、$CH_3COONa_3 \cdot H_2O$ 作 PCMs，用硼砂作过冷抑制剂，用交联聚丙烯酸钠作分相防止剂，可制成用于园艺温室保温的 20℃ PCMs；以 $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ 和焦磷酸钠作过冷抑制剂，使用 $CH_3COONa_3 \cdot H_2O$、KNO_3、NH_4NO_3 等作 PCMs，可在室内设定温度达到 55 ～ 58℃后断电取暖。

2012 年，华盛顿大学分子工程系办公用楼的墙壁和天花板采用了特制的相变凝胶材料，帮助减少楼内办公室降温所需的能源消耗。2014 年，美国罗德岛设计学院成功开发出建筑屋顶用 PCMs，可以通过控制穿过屋顶的热通量，满足建筑屋顶的隔热保温需求。该材料既可统一用于新建筑的开发，也可用于老式建筑的维护；同时可彻底消除渗透汽化玻璃纤维膜对空气及人体产生的微弱不利影响，夹层中的特种网络状纺粘非织造布还可以阻挡紫外线（通过物理方式将紫外线的穿透能力降低 40%）。该建筑屋顶 PCMs 在研发初期受到美国艾利普斯材料公司的经济支持，自 2014 年 1 月推出以来，已经得到美国 New Kougt 公司、美国 Unum 公司等建筑材料生产企业大约 2 000 万美元的生产订单。

2011 年，北京中瑞森新能源科技有限公司成功研制出无机 PCMs，相变温度 -50 ～ 130℃，已通过国际、国内相关权威机构检测和认证，其性能参数和技术指标完全达到或超过国际同类材料。这种无机、环保的相变材料及其延伸的相变储能技术的出现，首次突破了国际企业在无机相变储能恒温技术领域的垄断。2014 年，江苏启能新能源材料公司开发出高密度高稳定性纳米复合 PCMs 并实现产业化应用，在全球相变储能领域取得了世界领先的突破性进展。相对于传统储热材料，其导热系数提高 3 ～ 4 倍，且在 5 000 次循环使用后无明显变化，预测性能可保持 20 年以上，并且热能损失较小，成本较低；同时，该材料的应用不受客观条件的限制，在偏远地区、自然条件或者基础设施缺乏的环境下优势更为突出。

2014 年 10 月，国家发改委、财政部、工信部联合发文印发《关键材料升级换代工程实施方案》，将相变潜热大于 40kJ/kg、阻燃性能达到 B 级以上的相变蓄能石膏板列入新型建筑节能材料，作为产业发展急需、市场潜力巨大且前期基础较好的关键新材料加快其成果产业化和规模应用，力求达到年产能 200 万 m^2，并实现 100 万 m^2 的示范应用。据业内专家预计，目前全球 PCMs 市场规模至少有 15 800 亿美元，中国有 1 400 亿美元，随着今后能源价格和用量的增加，每年市场需求还将增长 15% ～ 20%。而 PCMs 作为新型材料和节能环保技术的代表，今后将会发展成为土木工程材料行业的支柱产业。

PCMs 的高成本是制约其广泛应用于土木工程领域的一个障碍。通过科技创新，一方面要研发符合环保要求的低成本 PCMs，如可再生脂肪酸及其衍生物；另一方面，要加大 PCMs 封装技术的研究，开发出低成本的封装材料和方法，最终使 PCMs 的成本降低，适合大规模推广应用，满足巨大的市场需求。

第 2 章　声功能土木工程材料

营造良好的声环境是土木工程领域需考虑的一个重要问题。声功能土木工程材料从传播声的路径入手，利用材料结构或构造吸声、隔声，减少噪声对结构物的影响，营造安静、舒适的生活环境。

2.1　吸声材料

2.1.1　吸声材料的定义及分类

当声波入射到一些多孔、透气或纤维状的材料表面时，声波会进入材料内部引起材料孔隙中的空气和纤维振动，由于摩擦、粘滞阻力及纤维的导热性，一部分声能化为热能被耗散，从而起到降低噪声、改善声环境的作用，这类材料统称为吸声材料。一般把 125Hz、250Hz、500Hz、1kHz、2kHz、4kHz 六个频率下平均吸声系数（吸收声能与入射声能之比）大于 0.2 的材料称为吸声材料，平均吸声系数大于 0.56 的材料称为高效吸声材料。

常用吸声材料的分类如图 6-2-1 所示，主要包括纤维状吸声材料、泡沫状吸声材料及颗粒状吸声材料。

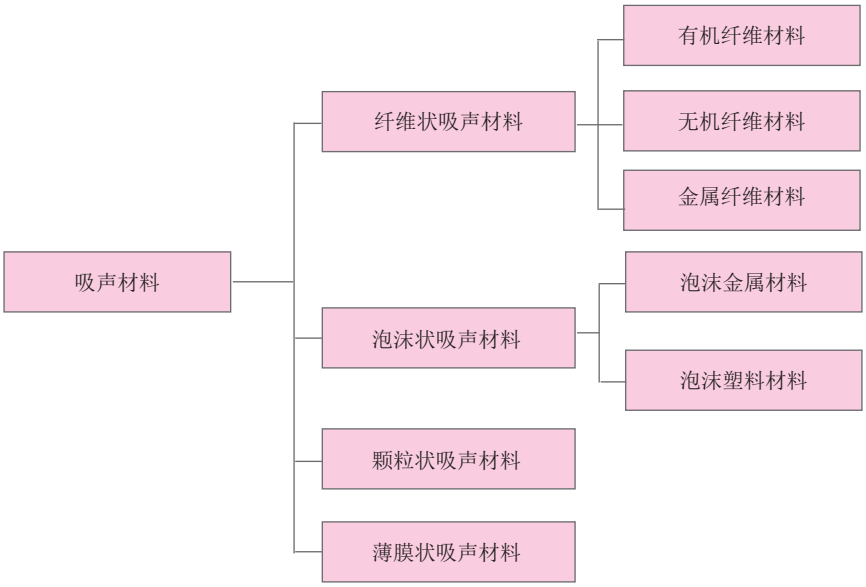


图 6-2-1　吸声材料的分类

纤维状吸声材料包括有机、无机及金属纤维类吸声材料。早期的纤维状吸声材料主要是指有机纤维及其制品，如棉麻纤维、甘蔗纤维、木质纤维、稻草纤维等天然纤维以及聚酯纤维、腈纶棉、涤纶棉等化学纤维，这些纤维的高频吸声性能良好，但防火、防腐及防潮性能差。近年研发的合成树脂纤维吸声无纺布，是使用非编织方法生产的块状材，具有疏松的纤维网结构，吸声效果优异。可将贴有吸声无纺布的穿孔板安装在留有空腔的龙骨上制成吸声体，此时无纺布的吸声效果相当于玻璃棉或岩矿棉。无机纤维吸声材料中使用较多的是玻璃纤维、岩(矿)棉纤维等，这些纤维材料质轻、不腐、不燃、不老化，但存在性脆易断、受潮后吸声性能下降等缺点。金属纤维材料中常用的是铝质纤维、变截面金属纤维及不锈钢纤维，单一金属纤维的高频噪声吸收性能优异，且具有电磁屏蔽和良好的导热能力。如，由两片铝网板夹住铝纤维毡构成的吸声结构，超薄轻质、强度高、耐候、耐高温性能好，是一种绿色吸声材料，特别适于室外露天使用，但成本较高。

泡沫状吸声材料根据孔结构的不同分为开孔型和闭孔型。开孔型吸声材料主要包括吸声泡沫玻璃、吸声泡沫陶瓷、吸声泡沫混凝土等；闭孔型吸声材料以保温隔热为主，又称绝热吸声材料，吸声效果较差，包括 EPS、XPS、隔热泡沫玻璃、保温隔热泡沫混凝土等。根据材料种类不同，泡沫状吸声材料可分为泡沫金属、泡沫塑料、泡沫玻璃、泡沫陶瓷及聚合基复合泡沫吸声材料等。泡沫金属中研究

最多的是泡沫铝及其合金。泡沫铝是在纯铝或铝合金中加入添加剂，经发泡工艺制成的兼有金属和气泡特征的吸声隔声材料，具有开孔型通孔和微通孔的泡沫铝吸声效果较好；加入 SiC 颗粒的铝基复合泡沫，阻尼和吸声效果比相应的铝泡沫要好。泡沫塑料产品主要有 PE、PP、PVC、PU、PF 及三聚氰胺泡沫等，三聚氰胺泡沫的阻燃性高，健康环保。泡沫玻璃质轻、隔热、防火、不易老化、施工方便，但泡沫玻璃板强度较低，施工中背后不宜留空腔。泡沫陶瓷由陶土、发泡剂和各种助剂，经过一定的工艺在 1 280℃的高温下烧制而成，内部具有三维网状结构，开口孔隙率高，吸声能力强，且具有耐候性强、抗腐蚀、抗热、抗振等优良特性。但泡沫陶瓷和泡沫玻璃均需高温煅烧，能耗较高；也可完全以硅酸盐水泥和发泡剂为原料，直接制成硅酸盐多孔吸声材料如发泡水泥等。近年来，橡塑型泡沫吸声材料的研究取得了很大的进展，橡胶复合吸声材料的种类不断增多，如在橡胶中加入各种无机或有机填料（如软木粉、蛭石粉、膨润土）制成填料型吸声橡胶等。实际工程中应用最多的泡沫状吸声材料是泡沫金属和泡沫塑料。

颗粒状吸声材料通常以多孔性材料如膨胀珍珠岩、陶粒、浮石等颗粒材料为骨料，以水泥或石膏等为主要胶凝材料制成。珍珠岩吸声制品强度较低，运输安装过程中易破损；陶瓷颗粒吸声制品密度大，板幅尺寸较小。

薄膜状吸声材料通常与其他材料附着在一起使用，如铝纤维吸声材料中的铝箔，可以贴附在普通窗户玻璃上的微穿孔 PE 薄膜等。

除上述基本的吸声材料外，近年来还出现了各种新型复合吸声材料。如硅藻土 /PU 多孔复合材料、纳米纤维吸声材料、梯度孔径通孔多孔铝合金、梯度结构纤维多孔材料，孔结构周期调制通孔多孔铝合金，双层的电解多孔铁镍吸声薄板，中间夹芯为瓦楞加筋板的轻质金属三明治吸声板等。

2.1.2 吸声材料的研究与应用现状

自从 19 世纪混响时间理论被提出后，吸声材料即被用来控制混响时间，早期使用的是植物纤维材料。20 世纪二三十年代，我国开始进口甘蔗板、木丝板及软质木纤维板等吸声材料，同济大学 4 000 人大礼堂的拱形屋顶及前后端墙均采用了木丝板。木丝板用水泥作粘结材料，价格低廉，但我国未能对其进行开发创新。60 年代，我国开始使用玻璃纤维吸声材料，随后出现了织物玻璃棉，主要用于会议室及贵宾室的吸声装饰墙面，由青岛福益阻燃吸声有限公司、上海欧文斯科宁玻璃纤维有限公司及绍兴自然科技开发中心等企业生产。20 世纪末，美国欧文斯科宁公司研制开发了一种被称为 Miraflex 的柔韧性好、不会形成粉尘

的新型玻璃纤维吸声材料，这是玻璃纤维工业诞生以来最重要的技术突破。近年来，韩国以聚酯纤维为原料，开发出一种被称为赛丝纶的吸声装饰艺术板，吸声效果好，强度高且具有阻燃性能。进入 21 世纪，无纺布逐渐成为吸声领域的热门发展材料。德国科德宝生产的 SoundTex 吸声无纺布采用了纤维素及玻璃纤维，重量轻、体积小、方便运输且符合现代工程项目对土木工程材料防火性能的要求；美国国际纤维素公司生产的 K-13 植物纤维喷涂吸声材料，由纯植物纤维和水基型胶结剂组成，高频吸声系数高，已用于我国国家大剧院的屋顶。

有机泡沫吸声板中使用较多的是 PU 板、三聚氰胺板、PVC 板等。Falke 等采用特定的多官能团聚醚多元醇获得了易于加工并具有粘性表面的 PU 泡沫吸声材料；Mendelsohn 等将 PS 中空多孔微球分散到 PU 中，实现了对吸声材料微孔特征的控制。我国宁波镇海吸音材料厂已成功研制并生产了阻燃 PU 泡沫吸声塑料板，安装时可直接粘贴，阻燃性好、容重轻、耐潮、易于切割且安装方便。钟祥璋等指出三聚氰胺板密度小、重量轻，使用温度范围大，在建筑室内音质和声环境的改善方面有着广泛的应用；张建勋等研究了具有高开孔率三维网格结构的新型三聚氰胺泡沫塑料，低频吸声性能好，阻燃性、隔热性、耐湿热稳定性、卫生安全性及二次加工性能良好，具有广阔的应用领域。PVC/丁腈橡胶/岩棉复合吸声材料综合了多孔吸声材料和共振吸声材料的优点，广泛适用于土木工程领域，但在制备过程中的岩棉会产生纤维粉尘污染；乙丙橡胶改性后的 PP 泡沫材料最大吸声系数可达 0.94，由此制成的泡沫材料微穿孔吸声体在中低频区的最大吸声系数达 0.98 以上。

泡沫金属及金属纤维吸声板的研究始于 20 世纪 40 年代末期，发展至今已经涉及 Al、Ni、Cu、Mg 等，因具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀、防火、防潮、无毒、美观等优良特性，在欧美已被广泛用于大城市高架桥吸声底衬、高速公路隔声屏障、隧道壁墙、室内天花板等处，且其在水下使用时不受阻抗及水温水压的影响。金属微穿孔板主要被用来控制混响时间，已在上海游泳馆工程中采用。Alcan（美国铝业）国际公司（现在是 Rio Tinto 铝业公司）和挪威 Norsk-Hydro 公司在研究耐磨铝制品时开发成功泡沫铝技术，并于 1990 年成立 Cymat 公司，2000 年开始正式生产商业化泡沫铝，2012 年国外泡沫铝市场产量达 290 万 t 左右。国内主要将泡沫铝用做高速公路和铁路的隔音屏（规格为 1 000mm×1 000mm×10mm，密度为 0.6g/cm^3 的泡沫铝板）或制成泡沫铝夹芯板。上海众汇公司生产的泡沫铝，具有优良的吸声性能，质轻（为铝的 1/10）并具有一定的强度，可用作土木工

程领域的吸声降噪材料。

无机泡沫多孔吸声材料因吸声系数高、适用频带范围宽、质轻、不腐且防火性能好，成为吸声材料的发展趋势。多孔陶瓷吸声板主要用于墙体的隔声和建筑装饰吸声材料，美国、德国及日本采用多孔陶瓷吸声板作为交通防噪的声屏障；湖北省机电研究院与深圳市楚粤环保工程公司合作开发了泡沫陶瓷吸声板，并将其用于声屏障工程中。

为适应绿色经济的发展要求，利用固体废弃物作为吸声材料的制备原料已成为目前广泛研究的热点。日本电力开发有限公司和大道砼有限公司合作开发出以粉煤灰为原材料，500 ～ 4 000Hz 频率吸声系数达到 0.9 的轻质吸声材料。美国派洛克公司用蛭石和水泥制备出一种喷涂吸声材料，25mm 厚时吸声系数为 0.60，具有防火、耐水、防腐蚀等优点，但材质疏松，碰撞时会有碎屑掉落。上海邦达新型建材有限公司开发了一种镁水泥泡沫吸声板，其穿孔板吸声系数高达 0.95。广州市建筑材料工业研究所研制出以焙烧煤矸石为骨料的吸声材料。国内专利以粉煤灰为主要原材料，制备出 125Hz 低频吸声系数大于 0.34，平均吸声系数大于 0.5 的吸声板材。中国建筑材料科学研究院和武汉天博环保科技发展有限公司研制出水泥基木梗复合吸声材料，100mm 厚、490kg/m^3 的水泥基木梗复合吸声材料吸声系数达到 0.84，抗折强度达到 2.8MPa，抗压强度大于 4.0MPa。

发达国家吸声材料的应用技术研究较为成熟，制备生产和安装已经规模化，且兼顾了艺术设计。国内吸声材料市场以玻璃纤维、石棉纤维、聚酯纤维和发泡塑料等多孔材料为主，玻璃纤维和石棉纤维不便于施工和维护，聚酯纤维易燃，在土木工程中使用有很大的安全隐患，面临着被淘汰或限制使用。随着国家对节能环保的重视，复合型及多功能吸声材料成为未来发展的主流趋势，如阻尼－吸声复合材料，阻尼－吸声－隔声复合材料，集防火、隔热、阻燃、防虫、防腐、美观等特性为一体的多功能吸声材料等。

2.2 隔声材料

2.2.1 隔声材料的定义及分类

凡是能阻断噪声的材料，统称为隔声材料。当声音入射至材料表面时，透过材料进入另一侧的透射声能越少，表示材料的隔声能力越强。入射声能与另一侧的透射声能相差的分贝（dB）就是材料的隔声量。常见的实心砖、钢筋混凝土、木板、石膏板、铁板、纤维板等都属于隔声材料。严格意义上说，几乎所有的材

料都具有隔声作用，但不同材料的隔声量大小不同；面密度不同的同种材料，隔声量也有较大的变化。

根据声音的传播途径，可将隔声材料分为隔固体声和隔空气声材料。隔固体声最好的措施是在产生和传递固体声的结构层中加入一定量的弹性衬垫材料，如软木、橡胶、毛毡等；隔空气声应选用表观密度大的材料，如钢筋混凝土、实心砖等，但这类隔声材料的吸声性能差；如果采用轻质或薄壁材料作为隔声材料，应辅以多孔吸声材料或采用夹层结构。

土木工程中常用的隔声材料有：①隔音板，在两块板材中填充高分子材料制成，隔音量可达到同样标准石膏板的 8 倍。②隔声墙板，通过添加表面活性剂产生超细微孔泡沫形成的墙板，如发泡水泥板。③隔音密封胶，专门用于隔声材料的密封，具有优异的隔绝噪声和振动阻尼特性。④减振垫，主要用于住宅、宾馆、酒店、学校、商务大厦等场所，具有极佳的阻尼减振和吸声效果，属于性价比极高的浮筑地板材料。⑤隔音毡，由高分子金属粉末、PVC 及各类助剂配制、反应、压延而成，单层隔声量可达 30dB 以上。⑥中空玻璃，用高强度、气密性好的复合粘剂将两片或多片玻璃与铝合金框或橡皮条粘合，充入惰性气体制成，有良好的隔热、隔声性能。⑦夹层玻璃，在两片或多片玻璃之间夹上聚乙烯醇缩丁醛（PVB）中间膜，可减少穿透玻璃的噪声数量，达到隔声效果。⑧隔音降噪涂料，属于可喷涂的粘弹性高分子聚合物，可涂于钢、铁、铝等金属材料及塑料等无孔材料表面，起隔声、减振降噪的效果，可降低噪声 6 ～ 20dB。

2.2.2 隔声材料的研究与应用现状

20 世纪 80 年代前，粘土砖是我国土木工程中使用的主要隔声材料，240mm 厚实心粘土砖墙的隔声量在 50dB 以上。80 年代初，江阴车船配件厂开始生产钢质防火隔声门。北京新型建材总厂从联邦德国引进石膏板和轻钢龙骨生产线，中间填放一层 4cm 厚的岩棉板，可达到 240mm 厚实心粘土砖墙的隔声效果；使用轻钢龙骨比木龙骨可使隔声量高 1 ～ 3dB；采用 Z 形减振龙骨，可使隔声量提高 1 ～ 2dB；在龙骨上采用 S 形减振条，隔声量可以提高 2dB；使用两层完全分离的龙骨（龙骨之间没有任何连接），隔声量提高 5 ～ 7dB；使用 100mm 厚龙骨比 75mm 厚龙骨隔声量提高 1dB 左右。80 年代中期，深圳地区从美国引进钢塑轻型隔声墙板（泰柏板）的制造和生产技术；随后，徐州市环境保护科学研究所研制成功双层均质半透明 PVC 薄膜轻质隔声结构；无锡环湖环保设备厂将阻燃玻璃钢与玻璃棉组成多层复合结构隔声罩，隔声效果显著。90 年代，硅酸钙系

列产品开始在国内兴起，8mm 厚硅酸钙板与 75mm 轻钢龙骨之间填放 60mm 厚岩棉板，隔声量可达 50dB；10mm 厚 GRC 板与 12mm 厚纸面石膏板中间填棉质材料可使隔声量比两层石膏板的隔声量提高 2dB；厚度为 6mm 的纤维水泥加压板与 75mm 工字形非金属龙骨组成墙体，中间填放岩棉，隔声指数可达 50dB。在墙体四周安装龙骨时垫入塑料弹性胶条，可防止缝隙造成的隔声量降低。

隔声材料的发展趋势是将不同性能的材料复合使用，制备出具有良好隔声效果及综合性能的隔声复合材料。陈烨璞等采用涤纶、锦纶等镀覆铅层并复合橡胶制成复合隔声材料；肖山宏等制成中、低频率隔声量在 15dB 以上的铅纤维 / PVC 基复合材料；王录才等用泡沫铝和实体铝制备了 500 ～ 1 000Hz 频率范围内具有最佳隔声效果的复合结构材料；蒋松霖等制备了热塑性聚氨酯弹性体 / 苯乙烯 - 乙烯 - 丁烯 - 苯乙烯嵌段共聚物（TPU/SEBS）交替多层复合材料，阻尼、隔声和力学性能优异。Uris 等的试验表明：将石膏板夹在原有的板层结构中，隔声性能可提高 7 ～ 8dB。钟祥璋等的研究表明：在轻薄板墙中填充夹芯材料可显著提高隔声性能，夹芯材料大多采用质轻、不燃、不蛀、绝热性能优异的玻璃纤维和矿棉纤维制品，如玻璃棉毡、半硬质玻璃棉板和半硬质岩棉板等。

纤维增强聚合物复合材料是目前最具发展前景的复合隔声材料。Narang 等研究了填充聚酯纤维轻质墙体的隔声性能；Johann 等研究了纤维素填充泡沫聚合物复合材料的隔声性能；Alan 等指出高分子复合材料的隔声性能较金属复合材料更为优异。罗以喜等采用丙纶无纺布、铜、铁等制得吸声无纺布隔声片材复合材料；傅雅琴等制备了玻璃纤维织物 /PVC 复合材料，其隔声性能优于单一材料，且隔声效果与增强材料的排列方式密切相关；李康等得到了蛭石粉 - 丁腈橡胶复合材料的最佳隔声工艺；杨天兵以蜂窝织物为增强材料，颗粒改性 PVC 为基体，制备了蜂窝织物 /PVC 隔声复合材料；姜孔明等设计开发了绒状竹原纤维 / 粉煤灰增强复合隔声材料；潘涵等以 $BaSO_4$ 粉末填充 PVC 基复合材料为基体，以玻纤织物、无纺布、木材为层合材料，制备出不同层合结构的复合材料。

第 3 章　光功能土木工程材料

在土木工程中合理利用天然光和人工光，可创造良好的光环境，满足人们工作、生活、审美和保护视力等要求。另外，利用光学传感还可进行土木工程结构

施工以及服役状态的探测。光功能土木工程材料是指可用于土木工程中的对入射光线有透射、反射、吸收及传播作用的光学材料，主要包括透光材料、反光材料、蓄光型自发光材料及光纤传感材料。

3.1 透光材料

透光材料是指对光具有透射或反射作用的材料，主要用于建筑采光、照明或饰面。透光材料可用来控制和调整发光强度，调节室内照明，进而创造良好的光环境。古代的透光材料绝大多数是天然的，包括牛角片、大理石等，后来发展为丝绸、纸张等。目前土木工程中所使用的透光材料主要有建筑玻璃、透光高聚物及透光混凝土。

3.1.1 建筑玻璃

1. 建筑玻璃的定义及分类

建筑玻璃以石英砂、砂岩或石英岩、石灰石、长石、白云石及纯碱等为主要原料，经粉碎、筛分、配料、高温熔融、成型、退火、冷却、加工等工序制成，主要品种是平板玻璃。平板玻璃是指厚度远远小于长度和宽度、上下表面平行的板状玻璃制品。随着现代建筑的发展，平板玻璃已不再只是采光材料，而是不断向多功能方向发展。

建筑平板玻璃按成型方式分为浮法、平拉、压延玻璃等。按功能进行分类，建筑平板玻璃的主要品种如表 6-3-1 所示。

表 6-3-1 建筑平板玻璃的特点及用途

分类		特点	用途
普通平板玻璃		用引上、平拉等工艺生产，少有波筋等	普通建筑工程
装饰玻璃	釉面玻璃	表面施釉，可饰以彩色花纹图案	装饰门窗、屏风
	磨光玻璃	表面平整、无波筋，无光学畸变	制镜、高级建筑
	拼花玻璃	用工字铅（或塑料）条拼接图案	装饰、门窗
	压花玻璃	不透视，有装饰效果	门窗及装饰屏风
	磨（喷）砂玻璃	透漫射光、可按要求制成各种图案	装饰、门窗
	彩色玻璃	可呈现各种色彩	装饰、信号等
	彩绘玻璃	可拼成各种图案和花纹	装饰等
	光栅玻璃	可显现三维立体图像	装饰等

（续）

分　类		特　点	用　途
安全玻璃	钢化玻璃	强度高，耐热冲击，破碎后无尖角	安全门窗等
	夹丝玻璃	夹有金属丝网，有安全、防火功能	安全围墙、透光建筑
	夹层玻璃	强度高，破碎后玻璃碎片不掉落	安全门窗等
	防盗玻璃	不易破碎，也不易进入，带报警器	安全门窗、橱窗等
	防爆玻璃	能承受爆破压冲击，不破碎、不伤人	观察窗口等
	防弹玻璃	能防一定口径枪弹射击，不穿透	安全建筑、哨所等
	防火玻璃	能防一定等级的火灾，在一定时间内不破碎，能隔焰、隔烟，并可带防火报警器	安全防火建筑
新型建筑玻璃	热反射玻璃	反射红外线，有清凉效果，调制光线	玻璃幕墙、高级门窗
	吸热玻璃	有吸热功能	防晒建筑等
	低辐射玻璃（Low-E 玻璃）	辐射系数低，传热系数小	高级建筑门窗
	选择吸收玻璃	有选择地吸收或反射某一波长光线	高级建筑门窗
	防紫外线玻璃	吸收或反射紫外线，防紫外线伤害	文物、图书馆等
	显色玻璃	在外界光照、电压及热条件下变色	遮阳、广告等
	中空玻璃	可保温、隔热、调制光线	寒冷地区建筑
	自清洁玻璃	可保持玻璃的长期洁净	玻璃幕墙等
玻璃砖	特厚玻璃	厚度超过 12mm 的玻璃	玻璃幕墙、安全玻璃
	空心玻璃砖	透漫射光、强度高	透光墙面、屋面
	玻璃锦砖	色彩丰富，可镶嵌成各种图案	内外墙装饰等

普通平板玻璃主要用于建筑物的门窗、墙面、室内外装饰等，起透光、隔热、隔声、挡风和防护等作用，也可用于商店柜台、橱窗等位置。窗用平板玻璃的厚度一般有 2mm、3mm、4mm、5mm、6mm 五种，其中厚度 2 ～ 3mm 玻璃常用于民用建筑；厚度 4 ～ 6mm 玻璃主要用于工业及高层建筑。

能呈现多种色彩和图案的彩绘玻璃和光栅玻璃是最新发展起来的装饰功能玻璃。彩绘玻璃是以有色玻璃或无色玻璃为画布，以特殊材料为颜料，经 3 ～ 5 次高温或低温烧制形成的家居装修用装饰玻璃，不掉色、耐酸碱侵蚀，易于清洁。光栅玻璃也称镭射玻璃，是以玻璃为基材，经激光表面微刻处理形成的激光装饰玻璃，在白光条件下可显现出三维立体图像。光栅玻璃耐冲击性、防滑性、耐腐

蚀性好，适用于大厅、内外墙面等美化装饰。

防盗、防爆和防弹玻璃属于特殊场所用安全玻璃。防盗玻璃是夹层玻璃的特殊品种，是将钢化玻璃、特厚玻璃、增强有机玻璃或磨光夹丝玻璃等以树脂胶胶合而成，中间夹层嵌入导线和敏感探测元件等接通报警装置。防爆玻璃是将两片或多片浮法玻璃中间夹以 PVB 胶片，经热压机压合排出空气，放入高压蒸汽釜内将残余的空气溶入胶膜而成，安全性高，适用于建筑物的天花板、地板、隔墙、工业厂房的天窗等。防弹玻璃是用透明胶合材料如 PVB 或聚碳酸酯纤维等将多片玻璃粘接在一起制成，是一种对枪弹射击具有防护能力的玻璃。

在平板玻璃表面喷涂金属及金属氧化物薄膜可制成热反射玻璃、低辐射 Low-E 玻璃或吸热玻璃。热反射玻璃具有单向透视性，且迎光面有镜面反射性，适用于现代高级建筑的门窗、玻璃幕墙、公共建筑的门厅和各种装饰性部位，也可用来制作双层中空玻璃和带空气层的玻璃幕墙，有隔热保温及节能功效。低辐射 Low-E 玻璃对波长 780 ～ 3 000nm 及 3 000nm 以上的远红外线热辐射的反射率相当高，可以有方向性地阻挡热穿透。吸热玻璃可吸收 70% 左右的红外辐射能，且具有防眩光、防紫外线作用，适用于炎热地区大型公共建筑的门窗、幕墙等，还可制成夹层、中空玻璃等制品，也可在玻璃液中引入有吸热性能的着色剂（氧化铁、氧化镍等）制成。

显色玻璃即变色玻璃，是通过在玻璃表面镀制可响应外界激励、动态调控光通过的功能性薄膜而成。依据响应外界激励的不同可分为：光致变色、电致变色、热致变色和气致变色玻璃。光致变色玻璃是在玻璃中加入卤化银，或在玻璃与有机夹层中加入钼和钨的感光化合物而成，着色、褪色可逆，耐久性好，可达到自动调节室内光线的效果，主要用于需要自动调节光照强度的建筑物门窗；在两片基体玻璃中夹以电致变色薄膜制成的电致变色玻璃，在电流或电场的作用下，可对光的透过率和反射率产生可逆调节，广泛用于建筑门窗；热致变色玻璃是将具有热致变色性质的材料（如 TiO、VO、V_2O_3 和 VO_2）镀制于玻璃表面而成，使得玻璃对太阳能的通透性随外界环境温度的变化而改变；气致变色玻璃由电致变色玻璃演变而来，由化学反应的电动势驱动变色，基本结构简单，但制备和使用成本高，目前市场上尚无气致变色玻璃产品。

2. 建筑玻璃的研究和应用现状

1874 年，比利时首先制出平板玻璃；1906 年，美国制出平板玻璃引上机，

此后各种用途和性能的玻璃相继问世。1904 年，我国开始筹建平板玻璃工厂。20 世纪 50 年代，中国建筑材料科学研究院开始进行钢化玻璃、夹层玻璃、防弹玻璃及中空玻璃等的研制，60 年代后期开发了热喷涂和真空磁控溅射玻璃镀膜工艺技术。70 年代末我国从比利时引进吊挂式钢化玻璃生产线，从芬兰引进夹层玻璃生产线。80 年代开始大规模引进中空玻璃生产线和镀膜玻璃生产线。90 年代后期，深加工玻璃发展迅猛，主要品种年产近 8.4 亿 m^2，先后研制开发了超薄玻璃（0.55 ～ 1.3mm）、超厚玻璃（15 ～ 25mm）、在线镀膜玻璃（阳光膜和 Low-E 膜）及自洁、超白、本体着色、微晶、防火超白压延、太阳能镀膜、太阳能光伏玻璃等新品种，并大力发展 Low-E 镀膜玻璃及其复合产品、超白压延和超白太阳能镀膜玻璃等相关产品，同时不断向高品质、绿色化、多功能、高附加值、高科技含量的制品化方向发展。

目前国内钢化玻璃加工企业 1 000 余家，年产量超过 2 亿 m^2；PVB 夹层玻璃年产量逾 4 000 万 m^2；中空玻璃加工企业 3 000 ～ 4 000 家，年产量超过 3 亿 m^2；各类镀膜玻璃年产量超过 8 000 万 m^2；已形成磨光、喷花、钢化、真空、贴膜、激光刻花、光致变色、杀菌玻璃等种类齐全的深加工玻璃体系。美国在玻璃工业技术发展指南中提出，2020 年美国平板玻璃年产量可达 500 万 t，占玻璃工业总产量的 25%，其中 80% 用于住宅、商用建筑和汽车玻璃。

我国使用较多的深加工玻璃包括钢化玻璃、夹层玻璃、中空玻璃、镀膜玻璃及变色玻璃，还有近年发展起来的高强耐热平板玻璃、热熔玻璃、超白玻璃等。我国是世界最大的钢化玻璃生产基地，2010 年 12 月，全国钢化玻璃产量达 2 668 万 m^2；截至 2009 年年底，我国夹层玻璃生产企业达 350 家，生产线达 500 条，生产能力在 7 000 万 m^2 左右。

美国的中空玻璃应用普及率已达 83% 以上，欧洲各国已达 50%，韩国已接近 90% 的水平。我国从 2000 年开始将中空玻璃列为推广应用的节能建材产品，并已研制出 Low-E 中空玻璃，可在基本不增加中空玻璃厚度和重量的情况下，达到更优异的保温隔热效果，适用于寒带大面积玻璃幕墙，特别适用于高湿度环境的室内使用。欧美多个游泳馆的工程应用表明，Low-E 中空玻璃在室内外 42℃的温差下可有效地防止玻璃内侧结雾。法国研制的双层中空玻璃，60% 的面积覆盖可以通水的铜管及银反射管，在吸收太阳能的同时，可起到太阳能热水器的作用。在两片玻璃间隔中夹入扁平型气囊经封胶密封周边构成的夹囊式中空玻璃已被市场认可。

发达国家的公共建筑和民用建筑普遍使用 Low-E 玻璃：美国 75% 的民用住宅和 1/3 的公共建筑玻璃都使用 Low-E 玻璃，德国的 Low-E 玻璃普及率高达 92%，中欧、北欧及南欧部分国家（如意大利）在建筑法规中规定新增建筑要使用 Low-E 玻璃，有些国家还规定建筑翻新时也必须使用 Low-E 玻璃。韩国也达到 90%，但我国 Low-E 玻璃的普及率仅为 15% 左右。我国的镀膜玻璃产品主要有在线阳光控制镀膜玻璃、高透型 Low-E 玻璃、遮阳型 Low-E 玻璃及双银 Low-E 玻璃等，2004 年山东蓝星玻璃集团有限公司与浙江大学研发出低辐射 Low-E 玻璃并投入产业化。日本的永续材料研究部门研制出以 30℃左右为界限，自动根据环境温度切换颜色的多层镀膜调光玻璃。

1964 年，美国康宁玻璃公司研发出变色玻璃，在土木工程领域应用较多的是电致变色玻璃。1969 年，Deb 首次发现 WO_3 电致变色现象；80 年代，美国科学家 Lampert 和瑞典科学家 Granqvist 等人提出了以电致变色膜为基础的新型节能窗，即智能窗（Smart Window），成为电致变色研究的一个里程碑。1999 年，德国德累斯顿的 Stadt Sparkasse 储蓄银行采用了欧洲第一面用电致变色玻璃制成的可控制外墙；2004 年，英国在伦敦的瑞士保险大厦玻璃幕墙上使用了电致变色技术；2005 年北京科技大学研制了施加 9V 电压即可起到窗帘作用的智能电致变色玻璃；2009 年，法国圣戈班集团宣布进军“智能窗”市场。

高强耐热平板玻璃一般是指硼硅酸盐玻璃及铝硅酸盐玻璃。德国肖特公司是国外唯一以浮法工艺生产平板高硼硅玻璃的厂家；2007 年，秦皇岛耀华玻璃公司建成浮法工艺高硼硅玻璃生产线。至 2020 年，我国将建成 10 条高强耐热平板玻璃生产线，产品包括易于钢化的高硼硅平板玻璃、超薄（厚度＜ 1mm）高硼硅平板玻璃和 2 ～ 3mm 铝硅酸盐平板玻璃等。

超白玻璃是低铁高透过率玻璃，透光率达 92% 以上，钢化后自爆几率极低。土木工程中主要使用的是超白浮法玻璃，可用于高档公共建筑的栏板、采光顶、玻璃幕墙等部位。2005 年山东金晶集团公司超白浮法玻璃生产线正式投产，2007 年烟台南玻集团开始进行超白压延玻璃的生产。

当今世界玻璃产业呈现出如下发展趋势：玻璃原片向大片、薄片、厚片、白片四大类发展；玻璃制品向具备强度、隔热、耐火、安全、阳光控制、隔声、自洁（环保）等优异的功能方向发展；深加工玻璃品种不断出现，如无色透明优质超薄玻璃、在线镀膜超薄玻璃等。与此同时，各种功能独特的玻璃纷纷问世。单向防弹玻璃可以阻止子弹从一个方向射入，却不妨碍子弹从相反方向射出。它是

在两片玻璃之间夹入两种不同的塑料——脆性的丙烯酸层和较软的、更有弹性的聚碳酸酯层而成。可用在浴室内的镀膜镜面，吸光率达 50%，不反光视觉效果好且装饰性强。功能独特的玻璃还包括打不碎玻璃、可钉钉玻璃、不反光玻璃、空调玻璃、真空玻璃、全息玻璃、调温玻璃、生物玻璃、天线玻璃、薄纸玻璃、信息玻璃、污染变色玻璃及排二氧化碳玻璃等。

3. 建筑玻璃的产业现状

据统计，全球智能玻璃市场规模在 2011 年已经达到 16 亿美元，预计 2016 年达 42 亿美元，其中土木工程用智能玻璃 2011 年市场销售额约 1 亿美元，预计 2016 年将超过 2 亿美元。2015—2020 年我国将新增建筑约 120 亿 m^3，新增节能建筑面积约 60 亿 m^2（按新增节能建筑的比例为 50% 计），涉及建筑节能玻璃面积约 12 亿 m^2，平均每年新增建筑节能玻璃用量约 2 亿 m^2，各类节能玻璃的增长率将有望增长。截至 2014 年，我国玻璃深加工企业约 4 000 家，年加工能力约 2.4 亿 m^2，深加工率仅为 25%，而目前国外玻璃行业的深加工率普遍在 70% 以上。我国节能玻璃的使用率也偏低，中空玻璃、Low-E 中空玻璃等在建筑中的使用率还不足 10%，欧美国家基本上普及了中空玻璃，Low-E 中空玻璃占全部中空玻璃的比例也超过了 50%。

在节能、安全、环保的经济发展背景下，镀膜玻璃、安全玻璃、抗菌玻璃、装饰玻璃、家具玻璃等的用量在成倍增长。国家已经把平板玻璃行业作为宏观调控的重点行业之一，在生产企业的布局，玻璃产业的工艺与装备，玻璃的品种和质量，玻璃行业的能源消耗、环境保护、安全、卫生和社会责任、监督管理等方面做了严格的规定。2014 年工信部发布《平板玻璃行业准入条件（2014 年本）》（征求意见稿），提出 2017 年年底前，严禁建设新增平板玻璃产能的项目；限制新建普通浮法玻璃生产线；支持现有普通浮法玻璃生产企业转产工业玻璃、在线镀膜玻璃，发展玻璃深加工；提高玻璃行业的准入门槛。

3.1.2 透光高聚物

1. 透光高聚物的定义及分类

透光高聚物是指可见光透光度在 80% 以上的纯净非晶态高聚物。透光高聚物相对密度小，绝缘性能好，且具有一定的强度和韧性，成型工艺简单，可制成透明的板、管、棒等制品；但可使用温度低，表面硬度小，不耐磨损，易产生微裂纹，在环境影响下会发生降解。

土木工程中常用的透光高聚物主要有聚甲基丙烯酸甲酯、聚碳酸酯等。

（1）聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA） 又称有机玻璃或亚克力，透明度高，耐化学腐蚀性好，力学强度高，冲击韧性好。经加热拉伸制成取向 PMMA 时，受枪弹射击后不会破成碎片，广泛用作有防弹要求的窗玻璃。

（2）聚碳酸酯（PC） 韧性高，耐热性好，6mm 厚 PC 板的透光率约为 83%，且玻璃化温度较高，但表面不耐磨损，不耐有机溶剂。PC 可用作门窗玻璃、银行、使馆、拘留所和公共场所等的防护窗和防弹玻璃等。

2. 透光高聚物的研究与应用现状

PMMA 主要用来制作建筑采光体、透明屋顶、棚顶、电话亭、楼梯和房间墙壁护板等。PMMA 挤出板制成的采光体，自重轻、透光率高且安全性强，使用方便，已广泛用于宾馆、酒店、体育馆及机场候机楼等建筑中。目前，美国和日本已在法律中规定，中小学校建筑用玻璃必须采用 PMMA。我国年消耗 PMMA 挤出板或浇注板约 5 000t 以上，但在土木工程中的用量较少。光学 PMMA、防射线 PMMA 等特种 PMMA 的研究及应用在我国尚属空白，其在土木工程中具有较大的开发和发展余地。

PC 板材主要用于窗、隔热板和天窗顶盖等，在防风外门、室内溜冰场等方面也有应用。PC 玻璃撞击强度是普通玻璃的 250 ～ 300 倍，是钢化玻璃的 2 ～ 20 倍，密度仅为玻璃的一半，燃烧时不会产生有毒气体，相同厚度下的隔声量比玻璃提高 3 ～ 4dB，隔热效果比同等玻璃高 7% ～ 25%，可取代玻璃用于建筑领域，是防弹玻璃的理想材料。PC 防碎玻璃的抗冲击性、尺寸稳定性、耐磨性更好，热变形温度更高。目前只有德国拜耳、日本旭化成、日本帝人化学、日本三菱、美国陶氏化学、美国 GE、韩国 LG 拥有 PC 生产技术，德国拜耳、美国 GE、道化学及日本帝人公司的 PC 生产能力占世界总能力的 80% 左右。亚洲 PC 产业发展迅速，对 PC 的需求量不断增大。全球 PC 应用已向高功能化、专业化方向发展，国内相关企业正在进行 PC 复合材料的开发、生产及应用，如用与 PC 折光率相近的玻璃纤维增强 PC/PBT（聚对苯二甲酸丁二醇酯）作为玻璃代替材料。

3. 透光高聚物的产业现状

国内 PMMA 的生产加工能力大，但产品结构不合理，只能生产普通品种产品，缺少土木工程行业需要的高附加值产品（如土木工程需求量很大的挤出板均需大量进口），在品种与质量方面均不能满足市场的需求。近几年，国内 PMMA 市场年均发展速度保持在 6% 以上，预计到 2015 年，土木工程领域用 PMMA 占 60% ～ 70%。

国内 PC 产品主要由德国拜耳、日本帝人等国外公司在国内建设的合资或独资企业供应。随着国内建筑行业的快速发展，我国对 PC 的需求量持续增长，2011 年我国 PC 进口总量达 122.8 万 t，2012 年达 137.5 万 t，2013 年我国 PC 表观需求量 145 万 t 左右，其中 137.7 万 t 来自海外进口。“十二五”期间我国各部委及地方政府明确将 PC 列为鼓励类和重点发展类项目。从 2014 年 7 月开始，此前连续走低的 PC 行情开始回升，PC 项目密集开工，近期在建项目包括：阳煤集团青岛恒源化工有限公司年产能 10 万 t PC 项目、宁波浙铁大风化工有限公司规划建设的 10 万 t 非光气法 PC 项目、上海拜耳科技材料有限公司实施的 20 万 t PC 新扩建项目、福建环球联合化工有限公司规划建设的 13 万 tb PC 一期项目、泉州恒河化工有限公司规划建设的 10 万 t PC 项目。目前处于前期建设阶段的项目是中沙（天津）石化 26 万 t PC 项目。据初步估计，2015 年我国 PC 项目的新增产能将达到 64.5 万 t，总产能超过 110 万 t。

3.1.3 透光混凝土

1. 透光混凝土的定义及分类

透光混凝土是由大量光学纤维或塑料树脂等透光材料与普通混凝土复合制成的高透明度特殊功能混凝土，也称透明混凝土，也有行业人士认为应将其称为导光混凝土。透光混凝土可使建筑物产生多变的空间效果，减少室内人工照明的消耗，且力学性能基本不受影响，完全可以用作结构材料和承重构件，同时具有良好的热学性质。

根据光纤加入时序的不同，可将透光混凝土的制作工艺分为先植法和后植法两种。根据添加的功能性材料不同，透光混凝土可分为纤维类透光混凝土和树脂类透光混凝土。纤维类透光混凝土是由大量的光学纤维（导光纤维、光导纤维）和普通混凝土组合而成，制作工序比较复杂；树脂类透光混凝土由导光树脂与水泥浆料结合而成，但导光树脂材料易老化，耐久性较差。

2. 透光混凝土的研究与应用现状

2002 年，匈牙利建筑师阿伦·洛孔济 (Áron Losonczi) 用占总体积 4% 左右的不同种类的光导纤维与细集料、高流态混凝土按一定的方式组合制成透光混凝土，并称之为 Litracon，2003 年申请专利并成立了 Litracon 公司，2004 年 Litracon 入选美国《时代》杂志评选的“2004 年度最酷发明”。这种 Litracon 具有较高的抗压强度，可以预制成砖或墙板，能让光线透过原本灰暗的墙体，呈现出似真似幻的效果。德国的 BFT 杂志首次对其进行报道，并在 2007 年德国

BAUMA 展览会公开展示。之后，Litracon 公司研发出以 PMMA 作为透光材料的新产品 Litracon pXL，成本降低，安装更方便，透光性更强；并推出了建筑用砖等几种透明混凝土产品。2004 年，美国国家建筑博物馆推出可以浇筑成各种形状制品的透光混凝土，JoelSosa 和 Sergio Omar Galvan 研制的透光混凝土比普通混凝土重量轻 30%，允许 80% 的光线通过。意大利水泥集团的研究人员通过预制多孔板后植入塑料树脂研制出透光混凝土“i.light”，以树脂代替了光纤和 PMMA，更加轻薄。

目前，国外关于透光混凝土的报道仍然主要来自 Litracon 公司。2009 年，德国亚琛的 Litracon 公司在混凝土内部植入约 5% 的玻璃光导纤维研发出透光混凝土，可使 18m 厚的墙体透光性能与 0.3m 厚的普通混凝土墙体大致相当。德国的 Roye 等研究了玻璃质光纤和聚合物光纤以矩阵形式排列的透光效果。在国内，2009 年北京榆构有限公司研制成功透光混凝土。该材料由大量光纤在混凝土块两面之间平行形成一个矩阵，光线通过这些光纤从混凝土块的一端传至另一端，使混凝土砌块透光度提高。李悦等应用纺织光纤技术研究了透光混凝土的成型方法，并采用硫铝酸盐水泥替代硅酸盐水泥，消除了碱－硅酸盐反应的影响；采用塑料光纤代替玻璃光纤，采用 2D 和 3D 织物形式对纤维的空间结构进行综合设计，有效避免了透光混凝土形成时收缩裂纹的产生；用光纤平行排列法制备了具有设计透光形式的透光混凝土。其研究结果表明：光纤内芯直径为 62.5mm、体积掺量为 20% 时，水泥砂浆试块的平均透光率可达到 A4 打印纸的 1.33 倍，透光效果较好。2012 年，中建三局将排布均匀、透光性好的塑料光纤与混凝土复合制成抗折强度高、抗压强度不受任何影响的透光混凝土。比亚迪股份有限公司通过在半硬化的混凝土中打下交错分布的孔，并在孔中灌入透明树脂原料，蒸汽养护后涂覆隔热透明材料制备了透光混凝土。

由于造价、技术等原因，透光混凝土还未得到推广，其实际应用主要集中在建筑的局部表达和表皮设计方面。2002 年，透光混凝土被制成地砖用在斯德哥尔摩市 Stureplan 广场的地面铺装上。弗朗哥教堂是透光混凝土应用上做的第一个尝试，但建筑师只做了一个 1 ： 33 的透光混凝土建筑模型。2004 年，透光混凝土被用于匈牙利布达佩斯一个私人住宅的室内遮阳墙，墙体宽 80cm、高 1 350cm、厚度为 8cm，采用的透光混凝土砖尺寸为 40cm×120cm×6cm；为纪念匈牙利加入欧盟而建立的欧洲大门的一侧由尺寸为 180cm×125cm×400cm 的透光混凝土砖块砌成。2005 年，透光混凝土被用来砌筑德国席登森小镇上

一个私人住宅的室内隔墙，用来分隔走廊和浴室，采用的透光混凝土砖尺寸为 100cm×120cm×10cm。2006 年，透光混凝土被用于砌筑日本万宝龙专卖店室内的一面装饰墙，砌块规格为 600mm×300mm×300mm。匈牙利塞拉（CellaSeptichora）博物馆大门是首个将透光混凝土砌块用于建筑表皮的案例，大门宽 361cm，高 244cm，墙厚 10cm，外圈包有钢框架，每块透光混凝土砖的尺寸是 60cm×10cm×40cm，共 48 块。2010 年世博会意大利馆共使用了 3 774 块透光混凝土预制板，总重量达 189t，覆盖了意大利馆 40% 的表面，横梁、立柱等部位透明度为零，立面中间区域可达 20% 的透明度，半透明板的透明度为 10%。

透光混凝土已经有十余年的研发历程，但仍然仅限于应用在预制制品和装饰构件上。实现透光混凝土的现浇施工，使其从单纯的围护构件转化为承重构件，并具有完善的力学性能和优良的耐久性是其发展的重要方向；加强对透光混凝土生产工艺的研究，使其能够在构件尺寸及形状上具有较强的适应性，并展现出不同色彩及视觉界面将是下一阶段的研究重点；轻质透光混凝土、发光透光混凝土、轻质发光透光混凝土等将成为透光混凝土领域未来发展值得关注的热点。

3.2 反光材料

3.2.1 反光材料的定义和分类

反光材料，也称回归反射材料或逆反射材料，是通过在材料中引入具有高折射率的玻璃微珠或三棱镜微晶格结构制成，可将光线按原路反射回光源处，形成回归反射现象。土木工程中主要使用的有反光膜、反光标线涂料和反光沥青路面。

反光膜是一种贴附在道路指示牌表面的具有各种理化性能的塑料薄膜，经光源照射后可将道路指示牌上的各种信息返回光源处。按照逆反射原理的不同，反光膜可分为玻璃微珠型和微棱镜型。利用玻璃微珠的高折射性，将入射光反射回光源处的反光膜称为玻璃微珠型反光膜。根据不同的结构，可将玻璃微珠型反光膜分为透镜埋入型（工程级）和密封胶囊型（高强级）。利用微晶立方角体下层的密封空气层，实现入射光线内部全反射的反光膜为微棱镜型反光膜。根据亮度可分为水晶级和超强级，近年来刚刚投入使用，主要用于一般公路。

土木工程用反光标线涂料可分为常温溶剂型、热熔型、突起振动型、水性型、雨夜反光陶瓷珠和热熔雨夜反光标线涂料等，还可将其制成预成型标线带等。常温溶剂型反光标线涂料主要有丙烯酸型和氯化橡胶型两类，干燥慢、使用寿命短；热熔型反光标线涂料干燥快、涂膜厚、使用寿命长、反光持续性好，目前在我国

高等级公路用反光标线涂料中占统治地位，但其施工效率低、难以补涂；突起振动型反光标线涂料在热熔型的基础上发展而来，主要形式有排骨式、圆点式、雨槽式，主要用于高速公路的减速线、边线；水性型道路反光标线涂料与沥青路面的粘结力差，且易粘脏、不耐磨，在国内尚处于开发和试应用阶段；雨夜反光陶瓷珠为微晶陶珠，可替代普通玻璃珠，具备全天候高亮反光的性能；热熔雨夜反光标线涂料是在原有热熔型涂料的基础上撒布高附着力雨夜反光珠而成；预成型标线带形状类似地板革，表面附有玻璃微珠，夜间反光效果好，施工简单。

反光沥青路面即“glassphalt”，是将废玻璃破碎后掺入到沥青混合料中制成，其路用性能与普通沥青路面相当，且在夜晚表现出良好的景观效果，被认为是一种会“闪闪发光”的路面。

3.2.2 反光材料的研究与应用现状

反光材料起源于 20 世纪 40 年代的美国，最初仅用于道路交通标志牌。1950 年，美国华裔科学家董棋芳研发出定向玻璃微珠，随后又研制出反光布等系列反光材料；1968 年，美国 ROWLAND 兄弟发明并注册微棱镜逆反射技术，此时的反光膜产品主要由美国 3M 公司和瑞飞公司生产；70 年代，中国计量科学院光学处的杨永刚将定向反光膜的结构原理、光学特点、性能测试等技术文献介绍到国内；80 年代美国 3M 公司进入我国反光膜市场，浙江台州反光材料公司开始研制高折射率玻璃微珠；90 年代国内相继研制出广告级反光膜、工程级反光膜、高强级反光膜等微珠内藏型反光材料；90 年代末玻璃微珠型产品在中国基本成熟，华日升（通明）、道明、晶丽、夜视丽等比较有规模的企业相继成立。21 世纪初，福建晋江鞋材企业研制出反光晶格片，进而形成间歇式微棱镜生产方式，但与发达国家的连续式生产方式相差甚远。

国外在路面反光标线涂料方面的研究起步也较早。1985 年，美国研制出第一个符合道路标线涂料设计要求的水性丙烯酸道路标线涂料树脂系统，并逐渐取代传统热熔型和溶剂型道路标线涂料；90 年代，美国陶氏化学开发了快干型丙烯酸产品，随后持续开发了与混凝土和溶剂型沥青表面有着良好黏着力和可在寒冷天气施工的快驰克™（FASTRACK™）新型水性丙烯酸道路标线涂料；美国、德国、西班牙、日本等 90% 以上的道路标线涂料采用水性产品，并已出现纳米路标涂料、双组分路标涂料、颜料薄膜处理等新型路标涂料。我国道路工程中主要应用的是溶剂型和普通热熔型道路反光标线涂料；双组分道路标线涂料处于初步研发阶段；水性道路标线涂料在使用过程中出现耐磨耐候性差、耐水耐酸碱性

差、耐污性差等问题。董立志等使用国外快干纯丙乳液混合耐候性好的氟碳乳液，改进了水性标线涂料的耐候性和耐沾污性，并加入石英砂和纳米 SiO_2，提高了水性道路标线涂料的耐磨性和抗压强度。石雄伟等以水性丙烯酸树脂、高反射率玻璃微珠、耐晒颜填料、助剂等研制了具有良好抗污染性、防滑性、耐候性和耐磨性的振动型反光道路标线涂料，使用寿命一般可达 2 ～ 3 年。孙道兴用硅烷偶联剂改性水性 PU 弹性树脂，并与纳米 SiO_2、功能多胺聚合物、颜填料和助剂等复配，制得了性能优异的自交联环保型道路标志涂料。除振荡标线外，各种反光标线都只能在非雨夜状态下对行车起到提示作用。点状雨夜标线是一种表面为规则或无规则点状的雨夜反光路面标线产品，已在德国、法国等欧洲国家广泛使用，在瑞士标线产品中占有 80% 的份额，德国 Degussa 公司生产的双组分点状道路标线施工 8 年后仍具有良好的排水反光能力。活性丙烯酸酯配制的双组分道路标线涂料，干结速度快，柔韧性、附着力及耐磨耐候性好，适用于点状雨夜标线的施工。

近年，路面反光标线带因施工方便、使用寿命长、成本低等优点被广泛应用。深圳市夜明珠高新技术有限责任公司发明了一种应用于路面的粘贴式陶瓷组合标线带材料；钱宏诚等发明了一种水溶性纳米反光涂料标线带；陆和生公开了一种表面层为洒上玻璃微珠的水性胶，中间层为底片，下层为压敏胶的多层结构道路交通标线带；四川省江油市豫蜀夜视丽反光材料有限公司和北京市路全通交通设施有限公司各自研发了主要成分为柔韧聚合物、颜料、玻璃微珠的工程级预成型反光标线带和雨点式预成型反光标线带；ATM 超亮标线带为美国进口产品，自带压敏胶，施工时可直接粘贴在路面上。

通过喷洒、涂抹或布设反光性材料提高路面的反光性能受到经济性的限制，不适宜大面积喷洒或粘贴，且在长期使用过程中，易出现脱落和被污染物覆盖的现象，路面反光能力下降。国外从 20 世纪 60 年代末开始研究反光路面材料，在沥青混凝土中加入废玻璃制成玻璃反光沥青路面，可有效提高沥青路面的夜间可视性，提高行车安全。我国学者研究了反光路面制备过程中玻璃与沥青的黏附性、最佳沥青用量及其配合比设计。浙江省庆元县交通局研制成功废玻璃掺量为 10% 的反光性沥青混合料，并运用于庆元县 54 省道实体工程中，路用性能良好，施工难度不大，技术可行。为提高反光材料的耐候性、耐磨性及使用寿命，叶昌等选用陶瓷或金属材料为基材，与有反光作用的玻璃微珠和无机溶剂制成反光釉，通过相应的控制工艺进行复合，研制了陶瓷基道路反光材料。

3.2.3 反光材料的产业现状

目前，反光材料市场主要的外资企业有美国的 3M、艾利和日本的恩希爱，国内企业有道明光学股份有限公司、西盛富莱定向反光材料有限公司、常州华日升反光材料有限公司等。

玻璃微珠型反光材料已经在我国形成了完整的产业链，微棱镜反光材料也被广泛用于道路反光标志。但长期以来，我国的反光材料市场尤其是高强级反光膜材料市场被进口产品垄断。近几年国家加大了对反光材料研制攻关的扶持力度。GB/T 18833—2012《道路交通反光膜》于 2013 年 6 月 1 日正式实施，该规范对道路交通反光膜进行了重新分类，按逆反射原理分为玻璃珠型和微棱镜型。棱镜型反光膜的国外生产商主要是美国 3M、艾利等，道明光学等一批国内反光材料企业近几年在微棱镜领域已经取得许多发明专利和实用新型专利，并建成了全球领先的微棱镜反光膜生产线，但高、精、尖的微棱镜型反光膜产品在国内的数量还不足，反光材料的生产技术、研发技术还有待进一步提升，反光材料的规模企业较少，企业自主研发能力较弱。反光材料的未来市场发展必然要求技术力量越来越强，产品质量进一步提高，成本进一步下降，这就对我国反光材料企业提出了更高的要求。

3.3 蓄光型自发光材料

3.3.1 蓄光型自发光材料的定义及分类

蓄光型自发光材料，又称光致光超长余辉蓄光材料、非放射性蓄光材料、无电源自发光材料等，俗称夜光粉，是一种能在太阳光或普通日光灯的照射下吸收并储存能量，在黑暗处再将能量转化为光能的功能材料。该材料主动吸蓄太阳光、灯光、紫外光、杂散光等可见光 5 ～ 10min 后，就可在黑暗中持续发光 12h 以上，具有高亮度、快吸光、长蓄光、化学稳定性好、耐候性强等优良性能，可根据实际需要，发出红、绿、蓝、黄、紫等多种彩色光。

按照化学体系的不同，可将蓄光型自发光材料分为三类。

（1） 硫化物系列蓄光型自发光材料 目前使用的有发光颜色为黄绿色的 ZnS:Cu 系列，发光颜色为蓝色的 CaS:Bi 系列，发光颜色为红色的 CaS:Eu 系列，但硫化物对人体具有一定的毒害性，发光亮度低，持续时间较短。

（2）铝酸盐体系蓄光型自发光材料 目前达到实用化程度的有：发光颜色为蓝紫色的 $CaAl_2O_4$:Eu,Nb，发光颜色为蓝绿色的 $Sr_4Al_{14}O_{25}$:Eu,Dy，发光颜色为黄绿

色的 $SrAl_2O_4$:Eu,Dy。$SrAl_2O_4$:Eu,Dy 磷光体是目前已知的时间最长的余辉发光材料，但其耐水性差、对原材料纯度要求高、生产成本高。

（3）硅酸盐体系蓄光型自发光材料　无毒、无放射性、耐水性好、紫外辐照性稳定、发光色多样。目前研制的铕、镝激活的焦硅酸盐蓝色材料已达到应用水平，含镁的正硅酸盐体系尚未得到应用。

根据发光机理的不同，可将蓄光型自发光材料分为由材料的晶格缺陷引起发光的自激活发光材料和由激活剂引起发光的激活剂型发光材料；按照激发材料的紫外光能量被基质吸收还是被激发剂吸收可分为复合型发光材料和特征型发光材料，硅酸盐、磷酸盐、铝酸盐等都属于特征型发光材料。用作激活剂以形成发光中心的元素主要是过渡族稀土元素。

3.3.2　蓄光型自发光材料的研究与应用现状

蓄光型自发光材料的生产和应用始于 20 世纪初。硫化物体系自发光材料的研究和生产最早集中在苏联和德国，现在主要集中在德国、日本和韩国。发黄绿光的 ZnS:Cu 系列是 1992 年以前发光亮度最高的蓄光型自发光材料，以 ZnS 为基质的绿、橙色夜光粉实现了工业化大生产。铝酸盐、硅酸盐及硫化物系列自发光材料的突出特点是利用稀土离子发光，发光亮度高，发光时间长，化学性质稳定。20 世纪 60 年代，Palma 首次观察到了 $SrAl_2O_4:Eu^{2+}$ 的余辉现象；1992 年，罗昔贤、肖志国等制备了多种稀土离子共掺杂的碱土铝酸盐发光材料，余辉时间可达 ZnS:Cu 的 10 倍以上；之后，国内外尤其是日本和德国对其进行了大量研究，但其耐水性能较差，发光颜色单一。1997 年，肖志国成功研制出硅酸盐体系蓄光发光材料，并成功合成了红色蓄光型自发光材料，这是目前最稳定的蓄光型自发光材料。Qiu 等在 1998 年首先报道了 Eu^{2+},Dy^{3+} 共掺杂的稀土碱土硼酸盐玻璃和硅铝酸盐玻璃的长余辉发光现象；1999 年，Murazaki 通过在传统的红色稀土发光材料 $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ 中掺杂 Mg、Ti 获得了发光时间可达 5h 的红色稀土长余辉发光材料。

将蓄光型自发光材料作为添加剂均匀地分布于各种介质中，可制备无机和有机自发光制品。中国、德国、日本及韩国发光制品的研究及产业化开展较早。

无机蓄光型自发光制品主要包括发光人造石材、发光陶瓷、发光玻璃、金属基及水泥基自发光制品，主要用于建筑室内外装饰、逃生引导标识及夜间道路标线等。金属基自发光制品包括白钢自发光指示标识、金属自发光面板和楼梯自发光防滑条等。

水泥基自发光制品使用范围广、性能优越，具有良好的发展前景。芬兰使用蓄光型自发光水泥建造了夜光公路，可将阳光和来往车灯的光照能量储藏起来，夜间就会显示出各种道路标线、标志等，方便夜行车辆，有利于交通安全。张金安等以核－壳结构聚丙烯酸酯乳液、水泥为基料，与长余辉发光体 $SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$ 复配制成聚合物水泥长余辉蓄能发光材料，可直接涂在金属、木材、砂浆、砖石、水泥石及聚合物面层上。研究表明：加入白水泥，可进一步提高发光涂料的抗侵蚀能力，加快涂层干燥速度；加入硼砂，可提高余辉的亮度并延长余辉时间。李宝骏等在普通混凝土上涂覆 4mm 厚的有机－无机复合强发光材料胶状物，并用 1mm 厚的 PMMA 和 SiO_2 高透光材料罩面，制成太阳能－发光混凝土砖，经太阳光照射后可在黑暗中持续发光 8 ～ 12 h。

有机蓄光型自发光制品是将蓄光型自发光材料以填料的形式加入到塑料、橡胶或纤维中，使其具有自发光功能，可注射成型（如发光开关）、挤出成型（如发光管、发光型材及发光楼梯扶手）、层压成型（如发光板、发光标识牌）或涂覆成型（如发光膜）。发光纤维可用来编织发光地毯、发光挂毯或制作发光壁纸。蓄光型聚酯长丝稀土夜光纤维是新型高科技功能纤维，以聚对苯二甲酸乙二醇酯为基础材料，采用稀土铝酸盐发光材料和纳米级助剂，经过特种纺丝工艺制成。粒径 7 ～ 8 μm，1 350℃条件下煅烧 2h 后得到的 $SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$ 发光材料，余辉亮度最高，时间最长，是制备夜光纤维用发光材料的最佳选择。

将蓄光型自发光材料用于涂料中制成发光涂料，可使涂装物的表面具有自发光功能，可用于高速公路、大型停车场、地铁等处。发光涂料在欧美一些国家已得到广泛应用，如用作路标漆、标识用地板漆、装饰用内外墙漆等。王晓春等采用 $SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$ 长余辉发光材料、成品清漆和助剂制备了溶剂型发光涂料，制成了表面光洁、易于清洁的长余辉发光标牌。盖广清制得的外墙水性蓄能发光涂料配方为：丙烯酸乳液 40% ～ 60%，超长余辉发光粉 12% ～ 40%，分散剂 0.3% ～ 0.5%，成膜助剂 1% ～ 3%，增稠剂 8% ～ 10%，中和剂适量。大连路明发光科技股份有限公司发明了一种由高分子聚合物乳液、蓄能发光材料、助剂和水组成的水性发光涂料，广泛用于室内外装饰、指示标牌、公共场所的应急指示等处。王东、张茂丽采用市售通用工业原料发明了蓄能自发光道路标线涂料，制作成本低，工艺简单，在无光和有光条件下都具有良好的发光识别性，发光强度高、发光时间长，可广泛用于各等级的无照明设

置道路上。

3.3.3 蓄光型自发光材料制品产业现状

许多大型国际机场、地铁及世界著名建筑都采用了中国大连路明自发光材料有限公司制作的标志指示产品，如重修后的美国五角大楼内部走廊里安装了宽12cm、长28km的中国大连路明自发光安全疏散指示标志。西方多数国家已经通过立法规定，建筑中必须使用新型环保自发光产品，欧盟国家也已颁布相应行业标准。在德国法兰克福机场、法国戴高乐机场、德国电信大楼、英国伦敦地铁等众多土木工程中，新型自发光材料已得到广泛应用。

我国蓄光型自发光材料目前已拥有40余项专利，包括高效发光材料、发光膜板、发光化纤、发光陶瓷、发光涂料等，形成了比较完善的发光产业链，适用于建筑装饰、交通运输、军事设施、消防安全等诸多领域。2001年，我国建设部和公安部对蓄光型自发光疏散指示标志在建筑中的应用做出明确要求，天安门广场改造、人民大会堂、三峡工程等国家重点工程都使用了蓄光型自发光疏散指示标志系统。2002年，北京市消防局制定的《消防安全标志设置标准》强制要求建筑中设置一定的电发光或自发光疏散标志。公路隧道内除布设普通的交通安全设施外，还应设置蓄能自发光型防火灾应急逃生系统。因为自发光逃生系统在烟雾中的穿透力是一般灯光的2～3倍，在湿度大、环境照度低的隧道特殊环境中应选用高发光亮度、耐温和耐水性的蓄能自发光型材料，要特别注重发光亮度、耐高温性、耐水性、耐酸碱性、耐盐雾腐蚀性和自洁性能。2014年，在新怀万线前坑隧道内，东阳市将金华公路局设计的蓄能自发光标志设计进公路建设的交安工程，主要包括自发光护栏轮廓标志、道口标柱（桥头警示柱）标志、隧道内自发光安全逃生出口及距离标志、人行道地面发光7字角型标志、配电洞室指示标志、消防洞室指示标志等。

3.4 光纤传感材料

3.4.1 光纤传感材料的定义及分类

光纤传感材料简称光纤，是指以波导方式传输光的介质材料。光纤一般由纤芯、包层、涂覆层和护套组成，其主体部分是纤芯和包层，如图6-3-1所示。

光信号射入纤芯后，会在折射率稍低的包层界面反射，从而在纤芯中继续前进，光线中的光波参数如光强、频率、波长、相位及偏振态等会随外界参数的变

化而变化，通过测量光纤中光波参数的变化可检测外界被测物理量的变化，因此，可将光纤用作土木工程传感系统。

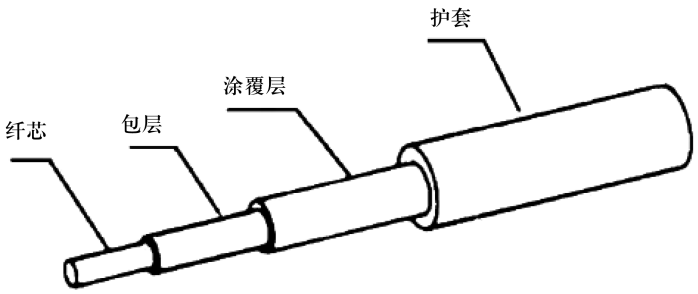


图 6-3-1　光纤传感材料的构成

按材质可将光纤分为石英玻璃光纤和塑料光纤。石英玻璃光纤又可分为石英光纤、氟化玻璃光纤和硫化玻璃光纤等。塑料光纤按所使用的聚合物不同可分为 PMMA、PSt、含氟透明树脂和氘化 PMMA 等。按光纤传输的光模，可将光纤分为单模光纤和多模光纤；多模光纤又可分为芯材折射率一定的阶段指数（SI）型或表芯型，和折射率由光纤芯部中心向表面对称递减分布的渐变指数（GI）型或聚焦型。

光纤材料具有径细、柔韧、体积小、质量轻、灵敏度高、抗电磁干扰强、能耗小、造价低廉、便于实现分布式和准分布式检测、集信息传输和传感于一体，宽频带和高数据传输以及耐高温、抗腐蚀等优良特性，是土木工程结构健康监测传感器的理想材料。

3.4.2　光纤传感材料的研究与应用现状

1989 年，Mendez 等人首次将光纤传感器用于混凝土结构健康监测，随后日、英、美、德等国家开始研发光纤传感器在土木工程中的应用。经过多年的研发，光纤传感技术已经由简单的混凝土结构过渡到复杂的地震、山体滑坡等系统中。1998 年，欧盟几个发达国家联合成立了“混凝土结构性能评估集成监测系统”（Smart Project）项目，根据该项目的研究成果，光纤健康监测可使系统的运行费用降低 10% ～ 20%，而且其模型对未来新建项目具有启发意义，可使整个试用期总费用额外节省约 10%。光纤传感器在土木工程中的应用，不仅可节省监测费用，产生巨大的经济效益；同时也会进一步提高大型桥梁、水坝等基础设施的健康监测水平，有着巨大的社会效益。我国在光纤传感技术方面的研究起步较晚。重庆大学智能结构研究中心于 1992 年率先开始研究光纤传感技术在结构工程中

的应用，黄尚廉等对 F-P 干涉仪在土木工程结构监测领域的应用进行了深入研究，取得了显著成果。1997 年重庆大学国家教委光电技术及系统开放实验室研发了一种多模光纤模域光纤振动传感系统，并应用于虎门大桥桥面铺装结构的模型实验中。欧进萍等研究了光纤光栅的应变传感特性和布设工艺，研制开发出光纤光栅应变传感器，应用于呼兰河大桥，可监测大桥在车辆荷载下的动态变形和温度变化。光纤传感器自身的优势吸引了越来越多的国内外学者投入到该领域的研究工作中，极大地推动了光纤传感在土木工程中的应用。

第 4 章　防水功能土木工程材料

土木工程防水已经从单一的建筑防水，延伸到高速铁路、公路、桥梁、地铁隧道等工程建设领域，防水材料也日新月异。防水材料性能的优劣直接影响人们的生产和生活质量，更是影响工程质量的一个重要因素。

4.1　防水材料的定义及分类

4.1.1　防水材料的定义

能够防止雨水、地下水、工业和民用的给排水、腐蚀性液体及空气中的湿气、蒸气等侵入土木工程结构物的材料统称为防水材料。防水材料在水的长期侵蚀和微生物作用下应保持性能稳定；在水压作用下应具有不穿透性能；应具有较高的拉伸强度和抗撕裂强度；应能在较宽的温度范围内保持其物理力学性能、化学性能、施工应用性、耐热度和低温柔度等性能的稳定性；应具有可操作性强，施工方便，对环境适应性强，与防水基层及相邻部位材料的相容性好等优良特性。

4.1.2　防水材料的分类

按材性的不同，可将防水材料分为刚性、柔性和粉状防水材料。刚性防水材料包括水泥浆、防水砂浆、防水混凝土等；柔性防水材料包括防水卷材和防水涂膜，如沥青卷材、密封胶等；粉状材料需借助其他材料复合制成防水材料，如膨润土卷材、膨润土防水毯等。膨润土卷材是将膨润土和粘结剂通过特殊粘结工艺制成薄型卷材，外用有机薄膜封装而成；膨润土防水毯是由高膨胀性的钠基膨润土填充在特制的复合土工布和无纺布之间，用针刺法制成的膨润土防渗垫，遇水

时可在垫内形成均匀高密度的胶状防水层，有效防止水的渗漏。

按原材料的不同，可将防水材料分为沥青类、橡塑类、水泥类和金属类。如，薄钢板可用于地下室或地下构筑物防水，薄铜板、薄铝板、不锈钢板可制成结构物变形缝的止水带，薄钢板、镀锌钢板、压型钢板、涂层钢板等可直接作为屋面板等。

按设防部位的不同，可将防水材料分为屋面防水材料（卷材、涂膜、刚性防水材料），地下防水材料（防水混凝土、刚性抹面、卷材、涂膜、金属层、注浆防水材料），楼层、厕浴间及厨房间防水材料（刚性防水砂浆、柔性涂膜、复合防水材料）及特殊部位防水材料等。

按外观状态的不同，可将防水材料分为防水卷材、防水涂料、防水密封材料、刚性防水材料和堵漏止水材料五大系列。

1. 防水卷材

根据主要组成材料可分为沥青防水卷材、高聚物改性沥青防水卷材、合成高分子防水卷材和水泥基柔性防水卷材。沥青防水卷材是传统防水材料，成本低，但拉伸强度和延伸率低，温度稳定性差，高温易流淌，低温易脆裂，耐老化性较差，使用年限短，属于低档防水卷材。高聚物改性沥青防水卷材和合成高分子防水卷材可大大改善沥青防水卷材的耐候性和感温性，其类型、产品如图 6-4-1 和表 6-4-1 所示，土木工程中以苯乙烯－丁二烯－苯乙烯（SBS）和无规聚丙烯（APP）改性沥青防水卷材的应用为主。水泥基柔性防水卷材是由聚合物改性水泥制成的柔性卷曲材料。

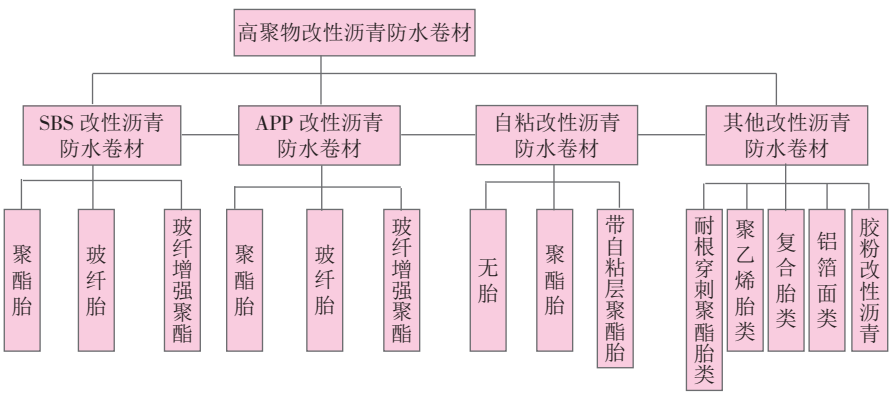


图 6-4-1　高聚物改性沥青防水卷材的类型和产品

表 6-4-1　合成高分子防水卷材的主要类型和产品

类　别	产品名称
橡胶类	三元乙丙（EPDM）卷材
	丁基橡胶（ⅡR）卷材
	氯磺化聚乙烯（CSDPE）卷材
	氯丁橡胶（CR）卷材
	再生橡胶卷材
树脂类	聚氯乙烯（PVC）卷材
	氯化聚乙烯（CPE）卷材
	高密度聚乙烯（HDPE）自粘胶膜卷材
	乙烯共聚物（EVA）和乙烯醋酸乙烯（ECB）改性沥青土工膜
橡塑类	热塑性聚烯烃（TPO）卷材
	氯化聚乙烯橡胶共混（硫化型）卷材

2. 防水涂料

防水涂料是指可涂刷在土木工程结构物表面形成一层隔绝水薄膜，从而起到防水、密封作用的黏稠液体材料，适用于结构物立面、阴阳角、穿结构层管道、凸起物、狭窄场所等细部构造处。防水涂料的主要类型及产品如表 6-4-2 所示。

表 6-4-2　防水涂料的主要类型及产品

类　别	产品名称
合成高分子涂料	反应性 ——PU、喷涂聚脲
	挥发型 —— 聚丙烯酸酯、硅橡胶
复合型涂料	聚合物水泥涂料
改性沥青涂料	水乳型橡胶沥青涂料（单组分）
	溶剂型橡胶沥青涂料（双组分）
	非固化和喷涂速凝型橡胶沥青涂料
沥青涂料	水乳型沥青涂料
刚性防水层材料	水泥基渗透结晶型

PU 防水涂料是一种双组分反应固化型防水涂料，柔韧性和延展性好，对基面伸缩裂缝的适应性强，应用范围广。经环氧树脂改性的丙烯酸酯防水涂料具有优良的防腐性和耐候性，经有机硅改性的丙烯酸酯防水涂料（有机硅含量在 10% 以上）具有优异的耐水性和耐酸碱性；弹性体丙烯酸酯防水涂料大量用于金属屋

面的保护。喷涂聚脲（SPUA）弹性体技术以异氰酸酯（MDI）类化合物为甲组分、胺类化合物为乙组分，在无催化剂的情况下经高压驱动相互撞击并在枪体混合室内湍流混合，喷涂在基面上快速反应形成 SPUA 弹性体涂层。纳米技术防水涂料由高弹性聚合物乳液与无机纳米材料复合而成，施工方便，柔韧性及耐水性好，干燥固化后涂膜弹性伸长率可达 300%。聚氨酯硬泡体（PURF）防水材料以聚醚多元醇与 MDI 为原料，采取无氟发泡技术，在一定状态下发生放热反应瞬间雾化，产生闭孔率不低于 95% 的 PURF，具有良好的不透水性和水蒸气渗透阻，防水保温寿命在 25 年以上，且施工和维修成本比较低廉，广泛用于高层住宅、宾馆、冷库、仓库等大型建筑的屋面。

3. 防水密封材料

通常用于填充构形复杂且不利施工的间隙，能与缝隙、接头等凹凸不平的表面通过受压变形或流动润湿而紧密接触或粘接，从而起到防水作用。防水密封材料作为密封功能材料的一种，其分类及产品现状将在第 5 章中详述。

4. 刚性防水材料

刚性防水材料是指以水泥为胶结料，掺入外加剂、高分子聚合物等形成的防水材料，按胶凝材料的不同可分为两大类：一类是以硅酸盐水泥为基料，加入无机或有机外加剂配制而成的防水砂浆、防水混凝土，如外加剂防水混凝土、聚合物砂浆等；另一类是以膨胀水泥为主的特种水泥为基料配制的防水砂浆、防水混凝土，如膨胀水泥防水混凝土。还可在普通混凝土结构表面涂刷、渗透防水材料（包括防水砂浆、水泥基渗透结晶型防水材料、水基渗透结晶型防水材料等）制成防水混凝土。

水泥基渗透结晶型防水材料（CCCW）是以硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥、石英砂等为基材，掺入活性化学物质制成的粉状材料，与水作用后，在湿混凝土中形成不溶于水的结晶体，起到抗渗防水的作用。按使用方法分为水泥基渗透结晶型防水涂料和水泥基渗透结晶型防水溶剂两大类。水泥基渗透结晶型防水材料（DSP）俗称永凝液，是具有渗透性的功能型防水剂，以碱金属硅酸盐溶液及惰性材料为基料，加入催化剂、助剂等制成，属于永久性水性防水材料，能渗入混凝土内部生成硅酸凝胶。

5. 堵漏止水材料

主要用于有水或潮湿环境下土木工程结构物的防水堵漏，需满足带水操作的施工要求。按施工方式，堵漏止水材料分为四类：灌浆材料（如水溶性 PU 注浆

材料、硅酸盐水泥超早强外掺剂、硫铝酸盐超早强膨胀水泥、水泥水玻璃、环氧树脂浆材等），柔性嵌缝材料（如止水橡皮及橡胶止水带、塑料止水带、丁基不干性密封材料等），刚性止水材料（如无机复合堵漏剂）和刚性抹面材料（如有机硅防水砂浆、阳离子氯丁胶乳水泥防水砂浆等）。

4.1.3 聚合物水泥基防水材料及瓦材

聚合物水泥基防水材料是最具代表性的复合防水材料。聚合物水泥基防水材料主要包括聚合物水泥防水砂浆（JF）、聚合物水泥防水浆料（JJ）、聚合物水泥防水涂料（JS）和其他水泥基聚合物防水材料（如防核辐射聚合物砂浆、聚合物水泥防腐砂浆、修补砂浆等）四类。JF 是在水泥砂浆中掺入一定量的有机硅、丙烯酸乳液等聚合物制成，具有良好的抗裂、抗渗及防水性，属于偏刚性的水泥基防水材料，适用于活动量较小的基层等部位；JJ 以水泥和细骨料为主要原料，以聚合物和添加剂为改性材料配制而成，使用方便，性能稳定；JS 以丙烯酸酯、乙烯－乙酸乙烯酯等聚合物乳液和水泥为主要原料，加入填料及其他助剂配制而成，水分挥发和水泥水化后固化成膜，属于双组分水性防水涂料，适用于活动量较大的工程部位，兼具聚合物涂膜的柔韧性和水泥基材料的强度及黏结性，是近十年土木工程用涂料中的一大类别。

建筑坡屋面的防水通常采用屋面瓦，包括粘土瓦、彩色混凝土瓦、石棉水混波瓦、玻纤镁质波瓦、玻璃纤增强水泥（GRC）波瓦、玻璃瓦、彩色 PVC 瓦、玻纤增强聚酯采光制品、PC 采光制品、彩色铝合金压型制品、彩色涂层钢压型制品、彩钢沥青油毡瓦、彩钢保温材料夹芯板、琉璃瓦等。粘土瓦、彩色混凝土瓦、玻璃瓦、玻纤镁质波瓦、玻纤增强水泥波瓦、油毡瓦等主要用于民用建筑的坡型屋顶，PC 采光制品、彩色铝合金压型制品、彩色涂层钢压型制品、彩钢保温材料夹芯板等多用于工业建筑，石棉水混波瓦、钢丝网水泥瓦等多用于简易或临时性建筑，琉璃瓦主要用于园林建筑和仿古建筑的屋面或墙瓦。近年，我国科研人员研制成功以低温瓷砂、瓷石为主料的干压陶瓷瓦，是可完全替代粘土瓦、水泥瓦，逐步替代传统琉璃瓦的唯一新型屋面材料，还可用于太阳能发电。

4.2 防水材料的研究与应用现状

我国防水瓦材的出现及坡屋顶防水技术比西方国家早将近两千年。近代土木工程防水材料的发展起源于天然沥青的发明，20 世纪 20 年代欧洲的沥青纸胎油毡传入我国，1929 年建成的南京中山陵使用油毛毡作为防水材料；1947 年，我

国第一家防水材料厂——万利油毛毡制造厂（现上海建筑防水材料集团公司）成立；60年代，法国和意大利先后发明SBS和APP改性沥青，1984年被引入我国，标志着我国现代工程防水材料开始发展；至2014年，SBS/APP改性聚酯胎和玻纤胎沥青防水卷材仍是我国土木工程防水材料的主要产品，尤其以SBS改性沥青聚酯胎防水卷材使用范围最广。美国Polyglass公司将白色弹性体涂料与改性沥青卷材结合形成反射率高达157%的SBS和APP改性沥青防水卷材；Soprema公司在改性沥青卷材上铺贴了薄膜太阳电池。自粘聚合物改性沥青防水卷材在近十年中的应用比例不断提高，包括矿物粒料覆面的SBS和APP改性沥青全自粘防水卷材、多道复合自粘改性沥青防水卷材等。

目前，美国公用建筑防水以EPDM、TOP、PVC等高分子卷材为主，民用住宅防水以自粘式沥青瓦为主；平屋面防水材料使用较多的是EPDM、热粘叠层油毡屋面、改性沥青卷材、PVC和TPO等热塑性片材、金属屋面、喷涂PURF及冷施工屋面等；坡屋面防水材料包括叠层沥青油毡瓦、粘土瓦、水泥瓦、木板瓦、天然石板瓦和金属瓦板等；地下工程防水材料主要选用橡胶沥青膜、丁基橡胶片材、PVC单层片材、单双组分液体施工膜（LAM）、膨润土板材、CCCW及新型止水带等。日本屋面防水主要采用改性沥青卷材和PVC卷材；地下工程防水主要采用PU涂料，其次是JF；环保型热熔沥青技术在韩国和日本应用较为普遍。欧洲屋面防水主要以沥青为原料，多数地区采用双层沥青基防水卷材，瑞典和挪威90%的屋面使用单层改性沥青防水卷材；中欧屋面防水以满足阻燃要求的PVC、TPO和PE等高分子材料为主，PVC卷材是主流产品，单层PVC卷材应用率达60%～65%。预计2016年欧洲沥青基防水卷材市场总量达9.95亿m^2，单层屋面卷材市场总量达4.42亿m^2。SBS改性沥青防水卷材应用量较大的国家为德国、法国、西班牙、意大利、英国，芬兰、德国、奥地利的SBS卷材占沥青基卷材的比例在80%以上，法国、挪威、西班牙、丹麦和瑞典也占到70%以上，意大利以使用APP卷材为主。

我国的高分子防水卷材产品主要包括EPDM、PVC、TPO、CPE、HDPE自粘胶膜（预铺法施工）、CPE橡胶共混、再生胶、土工防渗片等。我国已先后从日本引进了10条EPDM生产线，又增加了几条国产的正规生产线，新推出的合成纤维背衬EPDM系统以喷涂低发泡PU粘结底面，用自粘密封胶带粘接接缝，防水功能优异；中外合资济南渗耐鲁泉防水材料公司生产的无纺布背衬PVC防水卷材，产品质量良好。HDPE自粘胶膜防水卷材及其预铺反粘技术于20世纪80

年代末在美国问世，90 年代初进入我国。北京东方雨虹防水技术股份有限公司通过技术革新，在 HDPE 预反粘技术方面打破了国外垄断。

PURF 防水保温材料在美国和德国已得到广泛使用，该产品在美国有 25 年不漏的工程实例。美国屋顶施工者协会根据大量的实际应用指出：PURF 防水保温体系是所有防水保温体系中唯一长效的屋顶预防护体系。国内生产该材料的企业主要有江苏仪征久久防水保温公司、烟台同化防水保温公司、北京三利保温公司、上海一山公司等。

SPUA 弹性体材料最早源于德国和美国。20 世纪 80 年代中期，美国 Texaco（即现在的 Huntsman）公司在世界上率先开发 SPUA 弹性体材料；1993 年澳大利亚引进该技术并投入商业应用； 2000 年，欧洲地区逐渐接受该技术并推广应用。海洋化工研究院（青岛）于 1995 年开展了 SPUA 的前期探索研究，1996 年组团赴美国 Binks、Graco、Gusmer 等公司考察喷涂设备，1998 年 7 月成功研制出 SPUA-102 防水、耐磨材料，2007 年和 2009 年分别用于京津城际铁路和京沪高铁防水层。目前，SPUA 弹性体材料已大量应用于高速铁路、地铁、隧道等的防水。

1924 年，关于聚合物乳液改性水泥材料的第一篇专利文章发表在 Lefebure 上。我国于 20 世纪 70 年代首次将 CR 添加至防水砂浆中，提高了防水砂浆的抗裂性和耐水性；80 年代初，将丙烯酸胶乳（丙乳）添加到防水砂浆中，提高了防水砂浆的耐久性；90 年代初引入日本的聚合物水泥基复合防水涂料技术；90 年代中期澳大利亚德高建材进入我国，主要生产聚合物水泥防水浆料 K11，随后我国颁布各项标准规范聚合物改性水泥材料的发展与应用。高性能及多功能聚合物水泥基防水材料体系是今后的主要发展趋势。

1942 年，德国化学家劳伦斯·杰逊在解决水泥船渗漏水的实践中发明 CCCW，而后出现加拿大的 XYEPX（赛帕斯）、新加坡的 FORMDEX（防挡水）、美国的 PENETRON（膨内传）、法国的 DISPEC、日本的 PANDEX 等数十个品牌，60 年代后 CCCW 开始作为混凝土结构背水面防水处理（内防水法）的有效方法。1995 年美国绿洲海洋化学公司在北京设立了 XYEPX 产品中国总代理机构，CCCW 正式进入中国市场。美国最早于 20 世纪 20 年代将 DSP 用于地下军事掩体的防水防潮，20 世纪 90 年代 DSP 进入我国并大面积使用，可用于无明水的任何情况下的混凝土基面。膨润土是天然纳米型防水材料，国内已开发出膨润土止水条、防水板、防水毯等，主要用于地下防水工程、市政、人工湖、垃圾填埋场

等工程。金属防水卷材主要用于种植屋面、车库顶层种植层，可达到抗根刺的效果。

在 2014 年工程防水技术交流会上，沈春林指出我国未来几年值得发展的十种新型防水材料包括：喷涂速凝橡胶沥青防水涂料、非固化橡胶沥青防水材料、渗透型环氧树脂防水材料、喷涂水泥基防水材料、聚合物水泥防水材料（JF、JJ、JS）、湿固化 PU 防水涂料（单组分及双组分 PU 防水涂料）、无机硅防水材料（无机硅渗透型防水保护剂、CCCW、无机硅裂缝自愈合型防水材料）、SPUA 防水涂料、新型 PU 灌浆材料、高分子系列防水卷材（高分子强力交叉膜反应粘、非沥青基自粘以及 TPO 防水卷材）。

欧美等工业发达国家防水功能材料及技术的主要发展动向可总结为以下几个方面：

1. 热反射屋面技术

热反射屋面技术即冷屋面技术，其发展前景良好。平屋面主要采用浅色热反射高分子卷材（如 PVC、TPO 卷材），或涂刷隔热反射涂料；坡屋面采用矿物颗粒制备的热反射沥青瓦，并进一步提高热反射防水材料的耐久性、抗污染性和耐光照性能。

2. 单层卷材屋面系统

单层卷材屋面系统发展迅速。单层 TPO、PVC、EPDM 等防水卷材外露使用，屋面板、保温层和单层防水卷材层组成防水保温一体化系统，并将进一步向节能、防火、抗风、抗雹、耐候等多功能化方向发展，还可与热反射屋面结合使用。

3. 光伏建筑一体化（BIPV）技术

BIPV 技术可将光伏电池组件封装到瓦状电池板中制成光伏瓦，或将薄膜电池 [包括非晶硅和铜铟镓硒（CIGS）] 与防水卷材结合制成光伏卷材，如美国陶氏化学的太阳能光伏瓦片等。

4. 种植屋面技术

除传统的混凝土屋面外，种植屋面技术还可采用聚酯、玻纤或铜箔胎和其他金属复合胎内增强的耐根穿刺抗菌高分子防水卷材，容器种植和种植毯种植屋面也在快速发展。

5. 新型防水材料

新型防水材料还包括正在开发的比水轻的改性沥青防水卷材，更低软化点的改性沥青，柔韧性耐久性优良的丁基胶带，预铺用反应型 EPDM 橡胶卷材，利用废橡胶、废塑料等制作的各种树脂瓦等。

4.3 防水材料的产业现状

近年来，我国防水材料正处于暴风式增长阶段。“十二五”期间是我国全面建设小康社会的关键时期，防水行业也迎来新的发展机遇。在此期间，我国将基本淘汰沥青油毡类防水卷材，主要防水材料产量的年均增长率将保持在10%以上。2015年，主要防水材料总产量达到16亿m^2，满足国内日益增长的房屋建筑和工程建设防水市场的需求。

至2013年，SBS/APP改性沥青防水卷材、自粘防水卷材和防水涂料占据70%的市场份额，如图6-4-2所示。

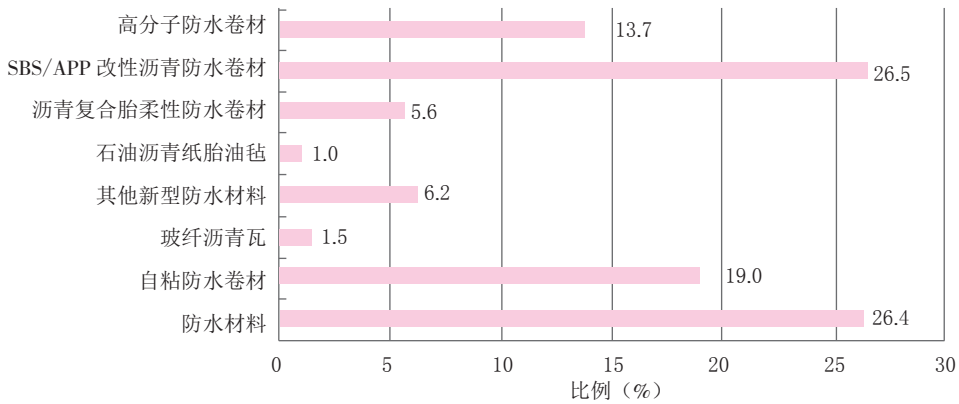


图 6-4-2 2014年主要建筑防水材料的产品结构

SBS/APP改性沥青防水卷材生产线已高达几百条，每条生产线上的年产量逾200万m^2；同时，高分子防水卷材的比重不断加大，生产厂家约有100家，总生产能力约1.5亿m^2以上，年销售量约1.2亿m^2以上，其中EPDM防水卷材近1 000万m^2，CPE防水卷材约1 600万m^2，再生胶防水卷材约200万m^2，PE土工防渗片约900万m^2，PVC防水卷材近3 500万m^2，聚乙烯丙纶复合防水卷材约4 000万m^2，其他防水卷材约800万m^2。国内建筑防水涂料市场以PU和JS为主，其次是丙烯酸酯防水涂料和乙烯－醋酸乙烯（VAE）防水涂料，PVC弹性防水涂料、石油沥青基防水涂料、CR改性沥青防水涂料和CCCW也占有一定的份额，高速铁路和客运专线防水层用SPUA防水涂料的年用量已超过2万t。

在2014年7月召开的第十二届中国国际屋面和建筑防水技术展览会上，参展企业展示了多种高性能多功能防水材料：北京东方雨虹防水技术股份有限公司展出了热塑性聚烯烃（PMT-TPO）单层屋面系统；深圳卓宝防水材料公司推出由涂料和卷材组成的“零缺陷”防水系统；凯伦建材重点推出了绿色环保的高固

含量白色 PU 防水涂料及高分子自粘胶膜防水卷材；唐山德生推出由性能优良的热塑性弹性体片材与具备良好粘结和蠕变性能的沥青自粘胶复合而成的热塑性弹性体（TPE）高分子自粘胶膜防水卷材；辽宁大禹推出的“TPZ”红芯分子自粘高分子防水卷材，采用高强红芯树脂为胎基，与具有分子级粘接技术的优质自粘胶经特殊工艺复合而成，具有持粘性、抗根穿刺、带水粘结等优点；深圳蓝盾展示了物化交联反应型（CPC）非沥青基耐久粘系列产品；凡士通公司展出了幅宽达 6.1m 的 EPDM 防水卷材；北京蓝翎环科引进了韩国非固化橡胶沥青防水涂料技术；大禹伟业等多家企业展示了喷涂速凝橡胶沥青防水涂料。

在防水材料产品推陈出新的同时，我国棚户区改造项目为防水行业开拓了新的市场空间；绿色建筑标准将带动种植屋面、单层屋面、光伏建筑一体化屋面和通风瓦屋面等绿色屋面系统的新发展；高速铁路、轨道交通等基础设施建设为防水材料带来了新的市场机遇和发展空间。但防水行业也面临一些不利的影响和挑战，如我国防水材料行业的产能达到市场需求总量的 5 倍，不少企业开工率不足，低水平重复建设现象严重；防水材料市场充斥着大量假冒伪劣产品，破坏了产品的价值尺度；防水企业科技创新和研发能力严重不足等。针对此现象，2013 年工信部出台了《建筑防水卷材行业准入条件》，国家质监总局出台了 2013 版《建筑防水卷材产品生产许可证实施细则》，国家质检总局、工信部联合发布了《关于加强建筑防水行业质量建设，促进建筑防水卷材产品质量提升的指导意见》（国质检监联〔2013〕644 号）等文件对防水材料生产领域进行整治。

第 5 章　密封功能土木工程材料

土木工程构件工厂化预制和施工现场装配工艺的发展，使得构件之间的接缝需要进行密封处理。密封材料已成为现代土木工程中不可缺少的配套材料，对提高土木工程结构物的防水、防火、节能、隔声、防尘等功能有着重要意义。

5.1　密封材料的定义及分类

密封材料又称嵌缝材料，是指能承受接缝位移以达到气密、水密目的而嵌入土木工程结构物接缝中的一类配套功能材料，其主要作用是防止水分、空气、灰尘和热量等的通过，实现土木工程结构物的密封。密封材料必须能长期保持防水性和气密性；不受热和紫外线的影响，能长期保持密封所需要的粘结性和内聚

性；其自身还应具有弹性，能长期经受被粘附构件的伸缩或振动等。

土木工程用密封材料的分类及主要品种如表 6-5-1 所示。

表 6-5-1　土木工程用密封材料的分类及主要品种

分　类	类　型		主要品种
不定型密封材料	非弹性密封材料	油性密封材料	普通油膏
		沥青基密封材料	橡胶改性沥青油膏、桐油橡胶改性沥青油膏、桐油改性沥青油膏、石棉沥青腻子、沥青鱼油油膏、苯乙烯焦油油膏
		热塑性密封材料	PVC 胶泥、改性 PVC 胶泥、塑料油膏、改性塑料油膏
	弹性密封材料	溶剂型弹性密封材料	丁基橡胶密封膏、CR 橡胶密封膏、氯磺化聚乙烯橡胶密封膏、丁基氯丁再生胶密封膏、橡胶改性聚酯密封膏
		水乳型弹性密封材料	水乳丙烯酸密封膏、水乳 CR 密封膏、改性 VAE 共聚物密封膏、丁苯胶密封膏
		反应型弹性密封材料	PU 密封膏、聚硫密封膏、硅酮密封膏
定型密封材料	密封条带		铝合金门窗橡胶密封条、丁腈胶－PVC 门窗密封条、自粘性橡胶、水膨胀橡胶、PVC 胶泥墙板防水带
	止水带		橡胶止水带、嵌缝止水密封胶、无机材料基止水带、塑料止水带

按构成类型，可将密封材料分为溶剂型、乳液型和反应型三类；按使用时的组分，可分为单组分和多组分密封材料；按材料的物理力学性能，可分为弹性、弹塑性和塑性密封材料；按组成材料，可分为金属类（铝、铅、铟、不锈钢等）、非金属类（橡胶、塑料、陶瓷、石墨等）和复合类密封材料（如橡胶－石棉板、气凝胶毡 -PU）。使用最多的是橡胶类弹性体材料。

按使用状态，可将密封材料分为不定型、定型和半定型三类。不定型密封材料又称密封膏，施工前为黏稠膏状，应用后在一定的温度条件下，可通过吸收空气中的水分进行化学交联固化或通过密封膏自身含有的溶剂水分挥发固化，形成具有一定形状的密封层，主要用于结构物的缝隙密封处理，如外墙板缝的密封，窗、门与墙面连接部位的密封，屋面、厕浴间、地下防水工程节点部位的密封，卷材防水的端部密封以及各种缝隙及裂缝的密封。密封膏品种很多，以合成高分子密封膏为主，如 PVC 嵌缝油膏、丁基密封腻子、聚硫密封膏、硅酮密封膏、PU 密

封膏等；还可将其按照位置特点设计成垂直缝隙专用密封膏和水平缝隙专用密封膏。定型密封材料是指具有特定形状的密封衬垫材料，如止水带、止水条、防水垫等；半定型密封材料主要是指遇水自膨胀胶条。

通常所说的密封材料是指不定型密封材料。新型改性聚硫密封膏是混凝土接缝工程的理想填缝剂；PU 密封膏属于中高档密封材料，延伸性好、机械强度高、粘结性强，主要应用于混凝土结构伸缩缝、沉降缝、机场跑道接缝等方面；硅酮类密封膏又称有机硅建筑密封胶，除具有一般有机硅材料的耐高低温、耐气候老化、高电绝缘等优异特性外，还具有对各类基材的粘结性好、抗变位能力强等特点，广泛用于建筑玻璃和金属幕墙等部位。

5.2 密封材料的研究与应用现状

1947 年美国开始使用聚硫系列密封材料，20 世纪 70 年代开发了硅酮和 PU 类密封材料，并将其用于全隐框玻璃幕墙的结构粘接装配工程；美国的密封材料已形成完善、健全的产品体系，且制定了聚硫、硅酮、PU、丙烯酸酯、建筑嵌缝油膏等一系列高、中低档产品标准，还颁布了 20 多项与之配套的试验方法标准。日本从 1952 年开始使用油性密封材料，60 年代初开始生产聚硫和硅酮类密封材料，70 年代开始生产 PU 密封材料，后又开发了改性硅酮类密封材料。该产品在性能上集中了硅酮和 PU 密封材料的优点，目前应用已非常普遍。据统计，日本使用的密封材料中硅酮和改性硅酮占 48.8%、PU 类占 27.8%、丙烯酸酯类占 13.5%、聚硫类占 9.3%，高档弹性密封材料已成为密封材料的主体。

我国土木工程用密封材料的使用始于 20 世纪 60 年代，以油膏、沥青基材料为主；70 年代发展了 PVC 胶泥、溶剂型和水乳型弹性胶种和定型密封、止水产品等；80 年代后开始发展硅酮、聚硫和 PU 反应性弹性密封材料；90 年代中期，我国工程密封材料仍以沥青基或焦油基的油膏、胶泥等低档产品为主，弹性类中、高档产品产量很少，产品结构呈金字塔状。1990 年后，硅酮类密封材料的开发速度加快，1993 年我国建成了国内第一条 4 000t/a 的硅酮类酸性胶生产线，首次实现了硅酮胶的大批量国产化，而后逐渐形成硅酮、聚硫和 PU 三大系列高档密封材料，以丙烯酸酯、丁基橡胶为代表的中档密封材料及传统的油性、沥青基低档密封材料的格局。“十一五”期间，我国土木工程密封材料行业取得了长足进步，我国已成为密封材料的生产和消费大国，各类密封材料（包括密封胶、带、填缝剂等）的年产量超过 60 万 t，其中大部分为高档弹性密封胶，产品结构与发达国家相似。2013 年我国建筑密封材料的年销售量达 47 万 t，以硅酮和丙烯酸

酯密封胶为主；其次是 PU 和聚硫密封胶，其中聚硫及硅酮密封胶等中高档产品增长速度最快。

土木工程使用的弹性密封材料中丙烯酸类密封胶价格比较低、使用量较大外，聚硫和硅酮类密封膏的价格接近，聚氨酯密封膏的价格较高。至 2014 年，国内拥有 2 万 t/a 生产线的硅酮胶生产企业超过 15 家，硅酮胶企业超过 150 家，生产能力超过 50 万 t，实际年产量已超过 40 万 t。目前，硅酮密封胶占据的市场份额超过 70%。

随着我国经济建设的蓬勃发展，密封功能材料的应用范围日益扩大，已从传统的建筑伸缩缝、板缝、门窗的密封扩展到玻璃幕墙、石材幕墙、金属屋面、机场跑道、高速公路以及给排水工程等新的应用领域。河南永丽化工有限公司研制了一种兼具 PU、聚硫橡胶结构特征和优点的双组分新型弹性高性能密封材料——聚硫氨酯，用作机场道面接缝密封材料。

国家科技部已将“新型防水密封材料”列为优先发展的高科技产业化领域之一，建设部也在国家化学建材产业 2010 年发展规划纲要中将新型防水密封材料作为优先发展的四个重点领域之一。“十二五”期间密封材料在重点领域的需求量持续增长：在玻璃、金属、石材幕墙中，密封胶都是不可或缺的主材之一；我国中空玻璃的使用率在新建建筑中不足 10%，在既有建筑中不足 1%，增长空间巨大，为配套密封材料提供了持续增长的需求市场；光伏屋面技术的发展使得开发兼有耐高低温、高位移能力、介电性能优良的专用密封材料产品成为研究热点；用于门窗接缝断热的 OCF 是新型密封节能产品，其推广应用将从北京周边、华东、东北地区向西北、华北、华中、西南地区扩展，市场需求继续增长；“南水北调”工程的衬砌接缝对密封材料的无害性、耐冲刷性和长期耐水性等性能提出更高的要求。

第 6 章　防火功能土木工程材料

随着我国经济建设的不断发展，土木工程朝大型化、立体化及构造特殊化方向发展，能够保证结构物安全使用的防火功能材料越来越受关注。科学合理地选用防火功能材料，提高土木工程主体结构材料的耐火能力，才能保证结构物的消防安全，最大限度减少发生火灾的危险性。

6.1 防火材料的定义及分类

防火材料是指具有耐高温、耐热、阻燃特性的材料，或者经过特殊加工形成的含有防火特性基质的合成材料。防火材料应具备以下特点：能够防止火灾蔓延，能够防止烟气蔓延，在阻挡火灾方面有一定的时效性，对人体危害小。

按形成方式的不同，可将防火材料分为天然防火材料和人工合成防火材料；按防火技术的不同，可将防火材料分为传统防火材料和新型防火材料。土木工程常用防火材料的种类、特点及使用部位如表 6-6-1 所示。

表 6-6-1 土木工程常用防火材料的种类、特点及使用部位

种类		特点	使用部位
无机防火板	高压装饰耐火板	防火、防潮、耐磨、耐油、易清洗、装饰性强	建筑物吊顶、内隔墙、家具、橱柜及其他有防火要求的部位
	矿物玻镁防火板	抗 1 500 ℃高温，装饰性不强	
防火门	木质防火门	自重轻，安装方便	防火墙的开口、楼梯间出入口、疏散走道、管道井开口
	钢质防火门	内部填充岩棉、硅酸铝纤维棉、珍珠岩、硅酸钙板等	
	木质防火门内衬钢板		
	玻璃防火门	防火、美观	
防火卷帘	钢质防火卷帘	防火、隔热、隔烟、抗压、抗疲劳、抗老化、耐腐蚀	建筑物较大洞口处的防火、隔热设施
	复合防火卷帘		
	无机防火卷帘		
防火玻璃	夹层防火玻璃	良好的透光性能和耐火、隔热、隔音性能	防火门、防火窗、高层建筑非承重外墙、疏散走道两侧隔墙
	夹丝防火玻璃		
	特种防火玻璃		
	中空防火玻璃		
	高强度单层铯钾防火玻璃		
防火涂料	饰面型防火涂料	应用较多的是膨胀型防火涂料，施工方便	降低材料表面的可燃性、阻滞火灾蔓延
	钢结构防火涂料		
防火封堵材料	有机防火封堵材料	机械强度高，无毒无味，施工方便，固化速度快，且水密性、气密性好	用于各类管道和电线电缆贯穿孔洞、较大的孔洞、楼层间孔洞的封堵
	无机防火封堵材料		
防火木制窗框	松木窗框	四周粘贴石墨密封材料，耐火时间较长、密封性好	民用和工业建筑窗户

1. 无机防火板

无机防火板主要包括岩（矿）棉板、玻璃棉板、珍珠岩板、漂珠板、蛭石板、硅酸铝纤维板、防火石膏板、泡沫混凝土板、加气混凝土板、水泥板、硅酸钙纤维板及氯氧镁无机防火板等。硅酸铝纤维俗称陶瓷棉，是以天然焦宝石为主要原料制成的棉丝状材料；由钙质、硅质、纤维等为主要原料，经制浆、成坯与蒸压养护等工序制成的轻质硅酸钙板材，尤其是纤维增强硅酸钙板材，防火性能好，密度小，可用于公共与民用建筑的隔墙、吊顶等部位；泡沫混凝土、轻质混凝土、粉煤灰混凝土砌块及板材等均具有优良的防火性能，以发泡水泥为芯材制成的水泥发泡防火彩钢板是夹芯板系列中耐火性能最强的一种新型防火板材，具有自重轻、保温隔热、美观耐用、抗震性好、施工速度快等优良特性，还可将发泡水泥用作防火门芯板，性能指标优于硅酸铝、岩棉、菱镁发泡等传统防火材料。纸面石膏板、GRC 板、无石棉硅钙板是目前我国生产量最大、应用最普遍的三种新型防火板材。

矿物玻镁防火板属氯氧镁水泥类制品，由镁质胶凝材料、网状玻璃纤维布及轻质保温材料复合而成，是一种能满足不燃性要求的新型环保板材。20 世纪 50 年代左右，我国开始研制矿物玻镁防火板，但受原材料、添加剂等的限制，未能进行深入研发。近年来国内外学者在克服氯氧镁水泥不燃防火板材的泛霜、吸潮等问题方面取得了较大的突破。2002 年，苏雪筠等利用高活性 MgO、少量添加剂及发泡剂制得氯氧镁水泥轻质多孔防火材料，用其制成的防火木门各项防火指标均优于国家甲级防火标准，氯氧镁水泥也适用于制作各种防火隔墙、装饰材料等，广泛用于防火及建筑装饰工程。顾钟红的研究表明：玻璃纤维增强氯氧镁水泥经注射成型工艺制成的防火阀门，比重轻、强度高、防火性能好、安装方便且成本低，综合性能优于钢质防火阀门。

2. 防火涂料

防火涂料主要由基料和阻燃添加剂组成，可降低结构物的可燃性，延长基材的着火时间，分为膨胀型（发泡型）和非膨胀型（普通型）防火涂料。其主要作用机理是：① 防火涂料本身具有难燃或不燃性，可保护基材不与空气接触；② 防火涂料受热分解会放出不燃惰性气体；③ 膨胀型防火涂料受热膨胀发泡，会在基材表面形成炭质泡沫隔热层。

根据使用部位的不同，可将防火涂料分为饰面型和钢结构防火涂料。饰面型防火涂料是指涂装在木材、塑料或纤维板表面的专用涂料，一般为膨胀

性防火涂料，分为溶剂性和水性两种。钢结构防火涂料可分为厚涂型（7mm< 涂层厚度＜ 45mm）、薄涂型（3mm ＜涂层厚度＜ 7mm）和超薄型（涂层厚度≤ 3mm）。厚涂型钢结构防火涂料主要由低密度的膨胀蛭石、膨胀珍珠岩绝热骨料和漂珠绝热粉料等无机物构成，一般采用喷涂工艺施工，喷涂厚度 8 ～ 50mm，防火性能优良但外观装饰性差；稻壳焦（RHC）是一种内含耐热纳米硅 / 碳微粒的多孔材料，可成为制备厚涂型钢结构防火涂料的新原料。超薄型钢结构防火涂料厚度小于 3mm，受火时会膨胀发泡以保护基体材料。混凝土结构防火涂料一般以无机和有机复合乳液为粘结剂，配以硅酸钙、硅酸铝纤维、阻燃剂等，以水为溶剂制成。

3. 喷射防火材料

喷射防火材料包括喷射纤维类和喷射水泥类两类。喷射纤维类防火材料，即矿物纤维喷涂，是指用专业喷涂设备将松散状的无机矿物纤维互相粘结交织在一起，形成三维立体网状结构，主要用于建筑幕墙保温、居住及公共建筑的防火保温顶棚等；喷射水泥类防火材料是将一种或多种粘结剂、集料、纤维与水混合形成泥浆，喷到需要保护的基材上。喷射防火材料耐火性强，耐候性好，在使用过程中不会出现开裂和脱落，在异形面上有施工优势，在国外已被广泛用于建筑防火喷涂。

4. 新型防火材料

德国科学家沃尔夫冈·克里斯在植物纤维素中加入不燃特殊矿物材料，制成了植物纤维新型防火材料；美国马萨诸塞大学和联邦民航局研制了聚羟基酰胺聚合物防火材料。2006 年，中国科学技术大学将晶须防火材料作为塑料、涂料和陶瓷等材料的改性添加剂。水合碱式硫酸镁晶须（MOS）可作为各种塑料的阻燃剂使用，高温燃烧时发生脱水反应吸收大量的外界热能，生成的水蒸气能稀释火焰区反应气体的浓度且能吸收烟雾，起到消烟的作用。将直径 0.8 ～ 1.2 μ m，长度 20 ～ 200 μ m 的 MOS 晶须按一定的比例高速搅拌分散到超薄型钢结构防火涂料中，可提高涂层及炭化层在火焰中的强度。石膏晶须代替玻璃纤维制成防火石膏板，可作为非承重的防火隔墙吊顶，还可用于工程中的外墙保温、墙面装饰、旧房改造、吸声、降噪等场合。用于阻燃、防火的晶须材料还包括氢氧化镁、二氧化硅、硼酸镁、硼酸铝、氧化锌以及氧化镁晶须等。

混凝土结构物在火灾作用下，因内部蒸汽压和热应力的存在会发生高温爆裂，导致结构截面的削弱和承载力的降低，进而使结构崩塌，威胁人们的生命安全。

1995 年，Breitenbucker 首次将 PP 纤维（掺量为 2kg/m^3）高温抗爆裂（HSC105）混凝土应用于法兰克福市的“Japan centre”建筑上，之后针对高温抗爆裂混凝土的研究陆续展开。除在混凝土结构外侧包裹保温隔热材料，阻止混凝土的高温爆裂外，目前研究较多的是 PP 纤维高温抗爆裂混凝土。其基本原理是：在火场高温作用下，混凝土内部的温度不断升高，当达到一定温度时，PP 纤维熔化，在材料内部形成很多连通孔隙，进而形成高压蒸汽的排出通道，阻止了爆裂的产生。

6.2 防火材料的研究与应用现状

6.2.1 防火材料主要产品技术研究

我国防火材料研究基础较为薄弱，一直延续“国外成熟技术引进为主，消化吸收后集成创新为辅”的发展思路，目前我国防火材料正朝着节能、高效、经济、环保方向发展。按照消防技术，可将土木工程防火产品技术分为防火板材产品技术、防火涂料产品技术、防火封堵材料技术和阻燃剂技术等。

1. 防火板材产品技术

20 世纪 90 年代中期，我国将无机不燃防火板材投放市场。1997 年公安部四川消防研究所开展了对不燃矿物棉防火装饰板的研究，但因其含有的石棉成分对人体有致癌作用，目前正被淘汰；石膏板、岩棉板、珍珠岩板等无机不燃防火板脆性大、装饰效果差，不能满足较高的装饰要求；硅酸钙板高温时强度会不断下降，限制了其使用范围；纤维增强硅酸盐板（又称火克 HAWK 板）是一种绿色环保节能型轻质建筑防火板材，烟毒指数为 0，耐火极限可达 4 小时。1984 年，日本 JIC 公司生产的硅酸钙防火装饰板（KB 防火装饰板），最高使用温度可达 1 000℃，主要用于钢结构防火保护；90 年代中期，德国和丹麦研制成功最高使用温度达 1 100℃的无石棉纯硬硅钙石高温隔热板，已用于日本、美国及欧洲的钢结构防火。日本已有 1/3 左右的厚质防火涂料市场被硬硅钙石型硅酸钙防火材料取代，但我国的此类材料尚处于开发试用阶段，如陈烜等以电石渣为基料成功制备高温型硅酸钙防火材料。新加坡的硅钙装饰板、英国的多功能复合硅钙防火板等都是比较具有代表性的硅酸钙防火板，但这些防火材料的装饰功能较差，我国除了在一些高档的涉外宾馆及外资工程装修中少量引进外，国内装饰装修工程中应用很少。部分国家使用的无机不燃防火板如表 6-6-2 所示。

表 6-6-2　部分国家使用的无机不燃防火板

名 称	生产国	厚度（mm）	容重（kg/m³）	防火等级
硅钙板	英国	20 ～ 60	475 ～ 1 500	不燃
硅钙板	比利时	5 ～ 18	950 ～ 1 600	不燃
硅钙板	日本	6 ～ 20	800 ～ 1 000	不燃
纤维增强石膏墙板	加拿大	9.5 ～ 16	880	不燃
石膏纤维板	德国	10 ～ 18	1 100	不燃
CSR 泥灰板	印尼	15	769	不燃
CSR 泥灰板	澳大利亚	25	769	不燃
虫蚀板	英国	25 ～ 70	430	不燃
纤维增强水泥夹心板	英国	6 和 9.5	1 450	不燃

防火板材正向质轻、高强、高耐火性尤其是高温耐火性方向发展，可采用涂层保护技术、表面粘贴瓷砖、墙纸、添加无机纤维、镁合金网等增强和改善防火板的性能。

2. 防火涂料产品技术

20 世纪 30 年代国外开始研制以水玻璃为粘结剂，以矿物为填料的无机防火涂料，但其耐候性、耐水性较差，易产生泛白、龟裂和脱落现象；1984 年，四川消防科学研究所研制成功无机非膨胀型防火涂料 ——LG 型钢结构防火隔热涂料，之后又研制成功一种以磷酸和氢氧化铝为基料，并掺加复合阻燃剂和助剂的耐水无机膨胀型防火涂料 ——E60-1 涂料。20 世纪 40 年代末期，我国开始研究以汽油、二甲苯等为有机溶剂的膨胀型防火涂料；1978 年以后，有机防火涂料快速发展，我国学者相继研制出膨胀型丙烯酸乳胶防火涂料、G60-3 膨胀型过氯乙烯防火涂料、A60-1 改性氨基膨胀防火涂料、SWH 型室外钢结构防火隔热涂料等，填补了多项国内涂料技术的空白。

20 世纪 90 年代中期，以德国为首的国际市场上涌现出超薄膨胀型防火涂料。1994 年四川消防研究所首次推出 SCB 超薄型防火涂料，掀起了国内超薄膨胀型防火涂料研发的高潮。目前，超薄型钢结构防火涂料已占据钢结构防火涂料大约 80% 的市场份额，并成为今后钢结构防火涂料的重点发展方向之一。同时，水性超薄钢结构防火涂料的研究力度也在不断加大，大连理工大学成功研制出膨胀型水性超薄环保防火涂料，耐热时间长且隔热性能好。改性丙烯酸树脂超薄型钢结构防火涂料，可在钢材表面形成坚韧、耐蚀的涂层，与钢材的粘结力、耐热性、

耐水性大大提高，且具有更好的装饰性、耐候性和耐腐蚀性。

绿色、复合及纳米技术是防火涂料技术的主要研究方向。水性 PU 是一种新型的绿色环保材料，可与多种阻燃成分共同制成钢、木及混凝土结构用防火涂料，其主要发展方向是与纳米 SiO_2、碳纳米管及丙烯酸酯复合使用。在基料树脂形成的胶囊中包入膨胀型防火助剂制成防火涂料，可有效地提高涂料的耐水性和防火阻燃性，还可起到抑烟的效果。四川消防科学研究所研制的 106 预应力混凝土楼板防火隔热涂料，以无机－有机复合物为粘结剂，配以膨胀珍珠岩、硅酸铝纤维等绝热增强材料，以水做溶剂混合搅拌制成。在有机防火涂料中加入天然沸石，可明显提高阻燃效果；加入空心微珠，可减轻涂料的质量，提高防蚀和耐磨性。崔波等以硅酸盐水泥为基料，添加阻燃剂、醋酸乙烯－乙烯共聚乳液及填料制成聚合物水泥防火卷材，可用于室内装饰。日本开发出一种利用塑料废物和火山喷出物制造防火建材的新技术。2001 年，北京化工大学成功研制出无机纳米阻燃剂，明显改善了纳米复合材料的各种机械性能。已有研究表明，在防火涂料中加入纳米 SiO_2 可大大增强燃烧后炭质层的强度，增强其与基底的粘结力，提高耐火极限，延缓老化过程；TiO_2 的加入会增加防火涂料燃烧后白色无机层中焦磷酸钛的含量，使无机层更加致密，延长耐火时间。任海龙采用硅丙改性调理乳液体系和纳米碳纤维对市售 B60-171（水性饰面型防火涂料）、NCB（XFA，水性室内薄型钢结构防火涂料）、NB（EH-4，水性室内薄型钢结构防火涂料）进行改性，制成了抗裂性好的大型冷库用防火涂料。

3. 防火封堵材料技术

防火封堵材料又称防火密封胶，分为有机和无机防火堵料两大类。有机防火堵料可塑性好，重复使用率高，主要用于封堵高层建筑管道贯穿处的孔洞缝隙；无机防火堵料耐火极限及机械强度高，尤其适用于较大的孔洞、楼层间孔洞等的封堵。l989 年我国研制出阻火包，2009 年开始出现防火封堵板材（防火涂层板和膨胀型防火复合板）、防火密封胶、泡沫封堵材料、阻火模块（防火发泡块、无机模块）等。随着国际上热膨胀防火技术的不断发展，研制和应用具有高效膨胀阻燃性能、满足环保要求、施工方便且价格低廉的新型贯穿防火封堵产品已经越来越受到重视，如无卤膨胀有机防火堵料、水基无卤膨胀防火密封胶及复合型超级膨胀防火板等。

4. 阻燃剂技术

目前常用的阻燃剂有无机和有机两种。无机阻燃剂主要包括装修材料中添加

的磷酸铵类、硼酸、多硼酸钠、氯化钠、硫酸盐和复盐混合物等，木质家具表面涂覆的锑系阻燃剂、氢氧化铝、氢氧化镁、含硼以及含钼阻燃剂与抑烟剂等。有机阻燃剂包括磷酸双氰铵、三聚氰胺、氯化石蜡、氯化橡胶等，但有机阻燃剂中多含卤素，开发无卤阻燃剂已成为世界阻燃材料领域的发展趋势。20 世纪 80 年代中期，欧美国家研发出阻燃性酚醛树脂复合材料（即酚醛 FRP），其具有氧指数高、耐热性好、发烟度低等特点，在美国已用于门、窗及室内装饰，并逐渐应用于高层建筑的墙壁、顶棚等；在日本，酚醛 FRP 已成为日本建筑基准法规中明确提出的不燃材料中唯一的有机材料。三聚氰胺磷酸盐（简称 MP）及其衍生物自膨胀阻燃剂作为新型高效阻燃剂被大量用于防火涂料、阻燃塑料等制品中，美国专利报道：MP 化合物作为防火材料的阻燃添加剂，可有效增强板材的阻燃性能，且无盐析现象。

阻燃剂技术的主要研究方向是：生产无卤、低烟、无毒、无腐蚀性阻燃剂，生产纳米阻燃剂，研发具有独特性能（如低渗出、高流动性、高耐热性、与玻纤相容等）的改性阻燃工程塑料，研发无机无卤膨胀型防火漆等。

6.2.2 新型绿色多功能防火材料的发展

绿色、多功能及智能化是防火材料必然的发展方向。如限制使用挥发性有机物（VOC）含量高的溶剂型防火涂料，提倡使用环境友好型涂料，包括水性涂料、无溶剂涂料、粉末涂料、光固化涂料等。太原市晋消阻燃实业有限公司研制的 SDH 水性隧道防火涂料，防火性能好，粘结力强，抗冻、抗潮、耐候性好，是多功能绿色环保防火涂料。

目前已有的多功能智能化新型防火材料主要包括防火微晶玻璃、新型阻燃剂、新型防火板、透明防火清漆、高性能阻燃织物、复合型防火防腐桥架、超大曲线跨度防火卷帘等。2008 年，晶牛集团利用浮法工艺生产出透明微晶玻璃，防火性能超过国家防火玻璃的最高等级标准，通过 1 000℃、120min 的防火试验，玻璃无破损。ZRY 天然纤维阻燃液由太原市晋消阻燃实业有限公司研制成功，无色透明、无毒、无味、不腐蚀，可用来处理棉织物、麻织物、木材、纸张、纤维板、刨花板、胶合板及其他植物纤维制品，可有效抑制火焰蔓延，阻止火灾发生。FQ 复合型防火防腐桥架以无机不燃材料为基体，内外表面复合有机高分子难燃材料，不需要再进行防火处理，桥架轻、安装维护方便、整体美观性好且价格较低，适用于户内外的各种环境条件。由树脂和发泡剂以 1 ： 1 体积比混合并机械发泡形成的艾格劳尼，为双组分阻燃混合泡沫，能起到密闭气体，填充没有机械

强度要求的密闭空间或裂隙的作用，是一种新型的防火填充材料。在硅橡胶基体中加入黏土类矿物粉末填料、结构控制剂及其他助剂可制成可瓷化高分子复合防火材料。德国开发出一种利用植物纤维素等原料制成的新型防火材料，不仅防火效果好，且使用方便，无化学毒性。冯峥嵘发明了一种可喷涂、刷涂、滚涂、刮涂，并可制成多彩花纹的适用于各类基材表面的多功能建筑防火涂料；马一平发明了一种适合于创造建筑热舒适环境的空调型防火涂料，适用于建筑外墙及大型钢结构涂层等。

6.3 防火材料的产业现状

自 20 世纪 80 年代以来，国内逐渐出现了一批定点生产防火材料的企业，但低水平重复生产的局面逐步显现。 数据分析显示，国内约有超过 2 000 家防火材料企业，平均年产量却不足 1.1 万 t，年销售收入达到 2 亿元以上的企业仅约 20 家。我国目前生产的阻燃、防火材料，大多档次低，不能满足一些高新技术行业阻燃防火工程的需要。如适用于高端阻燃聚酰胺的新型阻燃剂（包括高分子量溴系阻燃剂），国内产品性能不够理想，应用有限；适于阻燃高性能 PC 的硅系阻燃剂，我国尚在起步阶段；无卤磷酸酯齐聚物，我国仍处于研发阶段。与此同时，我国现使用的阻燃剂中卤系比例过高，在无卤化进程方面远远落后于西欧和美国，应尽快采取措施减少卤系阻燃剂的用量，大力增加无机阻燃剂（包括磷系、铝－镁系、硼系、硅系等）的用量，努力增加有机磷系、磷－氮系（包括膨胀型阻燃剂）、氮系阻燃剂的用量，逐步改善我国阻燃材料和阻燃剂的结构。目前，应用热膨胀防火技术的无卤膨胀型防火封堵系列产品已研制成功，其具有高效阻燃效果且能满足环保要求，部分产品填补了国内空白，防火阻燃性能达到国际先进水平。

防火材料行业正开展以高技术含量、高附加值为目标的产品结构升级。在产品结构的升级过程中，将形成“三个替代”，即高档材质对低档材质的替代，不定型产品对定型产品的替代，功能型产品对普通产品的替代。

第 7 章　装饰功能土木工程材料

装饰材料是集材性、工艺、造型设计、色彩、美学于一体的材料，是品种门类繁多、更新周期最快、发展过程最为活跃、发展潜力最大的一类土木工程功能材料。装饰材料决定着土木工程结构物装饰档次的高低，对美化城乡建筑、改善

人们居住和工作环境有着十分重要的意义。

7.1 装饰材料的定义及分类

7.1.1 装饰材料的定义

装饰材料又称饰面材料，是指在土木工程结构物主体结构完工后铺设或涂装在表面起保护、装饰和改善环境等作用的材料。装饰材料可有效提高土木结构物的耐久性和安全性，降低维修费用；美化结构物的内外使用环境；增强结构物的物理性能，改善或改变使用空间等。装饰材料应具有一定的颜色效果、光泽度、透明性、表面组织、形状、尺寸等立体造型性能，还应具有一定的强度、耐水性、抗火性、耐侵蚀性等使用性能。

7.1.2 装饰材料的分类

装饰材料种类繁多，并有多种分类方法。下面主要介绍三种常用的分类方法。

1. 按照装饰部位分类

（1）内墙面装饰材料　主要有墙纸、墙布、石材、涂料、墙板、玻璃、金属、陶瓷砖及近年兴起的植物纤维模塑三维立体墙体装饰材料。

植物纤维模塑三维立体墙体装饰材料是一种以植物纤维化学纸浆为原料的可降解环保型复合材料，具有防冲撞、美观耐用、吸声保温、防水防潮、质感高档等优良特性，与普通的瓷砖、墙纸等装饰材料相比，价格低，安装简便，色彩丰富。祝磊等的研究表明：以蔗渣浆和竹浆混合制备植物纤维模塑墙体装饰材料时，两种纤维可在结构上发挥互补效应，纤维能更好地“交织”在一起，明显地改善墙体装饰材料的物理性能。他们还在竹浆中加入一定量的阳离子淀粉及氢氧化铝作为阻燃剂，制备了阻燃型植物纤维模塑墙体装饰材料。

（2）地面装饰材料　主要有地毯、石材、陶瓷砖、木地板、塑料地板、软石地板及其他具有特殊功能的地板。

软石地板由天然大理石粉及多种高分子材料复合制成，既有天然大理石的纹理，又有特殊的图案与性能，具有柔、轻、坚、防滑、防火阻燃、安装简单等优良特性，且价格低廉，绿色环保。

（3）吊顶装饰材料　主要有墙纸、墙布、涂料、塑料板、石膏板、铝合金扣板、玻璃棉装饰吸声板、软膜天花等。

软膜天花又称弹力布，采用特殊的 PVC 材料经一次或多次切割成形、高频焊接而成。软膜天花不仅具有良好的隔声效果，还可降低室内热量的流失，表面

的凹凸纹可加强灯光的折射度，且抗菌防水，属于多功能装饰材料。软膜天花始源于 19 世纪的瑞士，后经法国人 Farmland Scherrer（费兰德·斯科尔）于 1967 年完善并成功推广到欧洲及美洲国家，已日趋成为吊顶材料的首选。

（4）外墙装饰材料　主要有外墙涂料、陶瓷砖、饰面石材、装饰砂浆、装饰混凝土、玻璃制品、金属装饰板、碎屑饰面及软磁贴等。

装饰砂浆是具有装饰效果的墙面抹灰的总称。欧洲国家广泛使用聚合物改性水泥基干混装饰砂浆替代涂料、瓷砖等外墙装饰材料，可制作出返朴归真的三维外观，且耐久性强，也可通过加入憎水剂、可再分散胶粉等外加剂，提高其憎水性和抗裂性。

装饰混凝土的原材料大多来源于建筑垃圾和工业废料，单位体积材料能耗低，表面可创造出天然大理石、花岗岩、砖、瓦、木等材料的铺设效果，且具有防水、保温、隔热、吸音等优良特性。装饰混凝土被广泛用于预制外墙板、现浇墙体及各种混凝土砌块的饰面，在欧美、澳大利亚、加拿大等发达国家作为绿色环保地面材料被迅速推广，可分为清水混凝土和露集料混凝土两大类。

软磁贴又称楼饰贴，是一种多功能柔性装饰壁材，采用废弃矿石尾矿、普通砂石、陶土等无机粉作为主要原材料，辅以少量水溶性高分子聚合物在特定的温度条件下得到无机浆料后，在光化异构及曲线温度催化下运用无机聚合碳纤皮膜技术制成，具有良好的强度和弹性，耐磨损、耐高温、阻燃防火、抗化学腐蚀、防滑、防水、隔声、隔热，广泛应用于商用及民用建筑的墙、地面装饰装修，特别适用于高层建筑、旧墙改造和外墙外保温饰面层。

2. 按原材料类型及施工方式分类

（1）石材类装饰材料　包括天然石材和人造石材两大类。天然石材主要是指花岗石和大理石，被广泛用于公共及民用建筑的墙面、柱面、地面及台面等部位。

人造石材是指以高分子聚合物、无机胶凝剂或两者的混合物作为粘合材料，以天然石材碎料、氢氧化铝粉末等为主要原材料，加入颜料、助剂，经搅拌混合、凝结固化等工序制成的石材。根据所用胶凝材料的不同，人造石材可分为树脂型人造石材和无机型人造石材（主要包括石英石和微晶石）。人造石材因具有花色可调、大面积铺贴无色差、节能环保等优势，已成为目前装饰石材行业发展的重要方向。西德石是人造石的一种，可随意切割成不同的形状、尺寸，可进行镂空、浮雕等，表面光滑，防水防火、不变形，色彩及花纹种类丰富，可像瓷砖一样拼贴使用，也可在墙面上进行大面积无缝拼接。

微晶石，也称玻璃陶瓷，是由天然无机材料经特定工艺高温烧结而成的新型微晶相与玻璃相复合材料，热膨胀系数小、硬度高、耐磨性好，具有特殊的电、热、光、磁和生物学性能，被称为21世纪的高档装饰材料。广义上的微晶石根据原材料及制作工艺可分为无孔微晶石、通体微晶石、复合微晶石三类。无孔微晶石又称人造汉白玉，光泽度高、硬度高、耐酸碱、耐磨损，适用于外墙、内墙、地面、圆柱、洗手盆、台面等高级装修场所；通体微晶石又称微晶玻璃，不吸水、不氧化、不褪色、不变形、耐腐蚀、强度高且光泽度高；复合微晶石又称微晶玻璃陶瓷复合板，是将3～5mm厚的微晶玻璃复合在陶瓷玻化砖表面经二次烧结制成的新型复合板材，成品厚度13～18mm，色彩丰富，耐酸碱性好，耐候性优良，强度高，可弯曲成型，不含放射性元素，A级优质产品可用于橱柜台面，C级一般产品主要用于建筑外墙装饰。微晶玻璃/金属复合装饰材料是一种既具有微晶玻璃的优势，又具有金属材料韧性的复合材料。武汉理工大学的郑伟宏等对Q235/Li_2O-$A1_2O_3$-ZnO-SiO_2系统微晶玻璃金属复合装饰材料的性能进行了研究。

（2）涂抹类装饰材料　主要包括装饰混凝土和装饰砂浆。

（3）涂刷类装饰材料　主要包括油漆、水性木器漆、涂料和胶粘剂等，目前使用较多的新型产品有抗菌釉面漆、乳胶涂料、液体壁纸、水包水多彩涂料、陶瓷隔热涂料、新型纳米弹性防水涂料、陶瓷隔热涂料及硅藻土装饰壁材等。

2013年苏州德达特种涂料有限公司发布了DALEK抗菌釉面漆，为水性双组分反应固化型防火漆，是在釉面漆防霉抑菌性能的基础上，添加环保安全的复合无机银离子抗菌剂制成，具有抗菌、防污、防潮、防腐、不黄变等优良性能。液体壁纸即壁纸漆，是采用高分子聚合物与进口珠光颜料及多种配套助剂精制而成的水性涂料，也可采用贝壳类表体经高温处理而成，无毒无味、绿色环保，有极强的耐水性和耐酸碱性，不褪色、不起皮、不开裂。水包水多彩涂料，又称液态花岗岩，是一种以水性乳胶涂料的小液滴构成分散相、保护胶水溶液构成连续相的多相分散体系，具有良好的抗裂性、耐候性及装饰效果，是一种环保、安全的高科技产品。新型纳米弹性防水涂料是将2%～3%的纳米SiO_2均匀地分散于丙烯酸酯乳液中制得的新型防水涂料，纳米粉料具有良好的触变性和成网特性，能够大大提高防水涂膜的抗老化性、附着力、拉伸强度和断裂伸长率，可直接涂于砖石、水泥基和石膏基材料的基层，施工方法简单。我国应用较多的是钛纳米聚合物，可将其与水性自修复底漆、环氧富锌或环氧铁红底漆配套用于钢结构等的

防腐。德国盾牌陶瓷隔热涂料是由极小的真空陶瓷微球与环保乳液制成的水性涂料，与墙体、金属、木制品等有较强的附着力，可直接涂抹在基体表面，有隔热保温的效果。将硅藻土制成硅藻泥涂刷于室内墙面时，可充分利用纳米孔道大表面积和界面吸附特性，起到净化空气、消除异味、呼吸调湿、保温隔热、吸声降噪、防火阻燃等作用，还可有效降低室内污染并改善室内空气质量。硅藻土还可用来生产室内壁纸，纸张体质轻软、平滑，重量轻，强度好，且绿色环保，也可作为防结露涂料的主要功能成分。目前，日本建材市场上的硅藻土装修材料主要有三类：含有不纯物的自然干燥品、普通窑烧制品和加入各种添加剂的窑烧制品。我国市场上销售的硅藻土装修材料主要有壁材（板材）、铺地材料、吊顶材料、水性涂料等。硅藻土装饰壁材已逐渐与乳胶漆、壁纸形成三分天下的态势。

胶粘剂是指能在两个物体表面间形成薄膜并把他们牢固地粘结在一起的材料。按粘结物质可分为有机和无机胶粘剂两大类；按形态可分为液体和固体胶粘剂；按用途可分为结构胶粘剂、非结构胶粘剂和特种胶粘剂（如耐高温、超低温、导电、导热、导磁、密封、水中胶粘等）三类；按固化方式可分为物理固化、化学固化和压敏胶粘剂。无溶剂环境友好型水基胶粘剂（白乳胶）正逐渐取代溶剂型胶粘剂（万能胶）。目前，较环保的胶粘剂有：聚醋酸乙烯酯（PVAc，单组分及双组分），双组分 MDI 胶，脲醛树脂胶（UF，粉状或液体），热熔胶（Hot Melt），EVA、PU、EVA 液体胶（单组分及双组分）以及溶剂型胶等。

（4）烧结类装饰材料　主要包括釉面砖、墙地砖、马赛克（玻璃马赛克、陶瓷马赛克等）、建筑琉璃制品等。

（5）纤维类装饰材料　主要包括地毯、挂帷遮饰制品等。

（6）裱糊类装饰材料　主要包括墙纸、墙面木软包、石英纤维壁布、墙布织物、墙基布或微薄木等。

墙纸是以纸为基材，以 PVA 塑料、纤维等为面层，经压延或涂布等工艺制成的墙体装饰材料。按照基材的不同，可分为纯纸、纯布、玻璃纤维和无纺布四大类；按照面材的不同，可分为纯纸面、纯布面、PVC 塑料、无纺布、木纤维、硅藻土、金属质等；按照墙纸功能，可分为防霉墙纸、阻燃墙纸、吸音墙纸、防静电墙纸及夜光墙纸等。墙基布是装修打底材料，贴上墙基布后再刷漆可防止墙面裂纹。墙面木软包是由化学合成纤维、海绵、复合板、木龙骨等构成的造型类复合装饰材料。

3. 按材料市场销售门类分类

（1）壁纸、墙布类　主要包括纸质壁纸、PVC 塑料壁纸、织物壁纸、玻璃纤维印花贴墙布、无纺贴墙布、化纤装饰贴墙布、丝绸壁布、金属壁纸、植绒壁纸、装饰画壁纸及特殊功能壁纸等。

无纺布是一种非织造布，是将切片、短纤维或长丝高聚物通过气流或机械成网，然后经过水刺、针刺或热轧加固，整理形成的无编织布料，具有柔软、透气、不产生纤维屑、强韧、耐用、价格便宜等优良特性，也可作为增强材料使用。

（2）地板地毯类　主要包括塑料半硬质地板、PVC 塑料卷材地板、防滑塑地板、抗静电活动地板、防腐蚀塑料地板、橡胶地板、拼花木地板、复合木地板、竹质拼花地板、化纤地毯、剑麻地毯、橡胶绒地毯、塑料地毯等。

（3）涂料类　主要包括 PVAc 乳胶涂料、苯丙乳液内墙涂料、多彩内墙涂料、硅溶胶无机内墙涂料、硅酸钾无机外墙涂料、溶剂型丙烯酸树脂涂料、丙烯酸系复层涂料、有机无机复合外墙涂料、环氧树脂地面涂料、PU 地面涂料等。

（4）装饰板材类　主要包括天然木质板材、人造板材、木塑板、PMMA 装饰板、PS 挤出板、塑料装饰板、浮印大理石装饰板、镁铝曲板、铝塑板、铝合金装饰板、不锈钢装饰板、石膏装饰板、玻璃钢装饰板、铜装饰板、水性陶瓷铝板等。

常见的木质人造板材有胶合板、纤维板、刨花板、细木工板、木丝板、宝丽板、饰面防火板等，广泛用于顶棚、隔断、踢脚板、门窗口等罩面板工程中。宝丽板是一种以胶合板为基层，表面贴上装饰纸后，再涂上一层聚酯树脂作为保护层的人造板，主要用于家具、室内墙面、车船内壁等的装饰，防火防潮，耐老化，表面平整光亮，造价低。无甲醛木质人造板是指生产过程中以无醛类胶粘剂为结合剂生产的各种人造板材。2006 年，中国林业科学研究院木材工业研究所研制成功无甲醛木塑胶合板，以木材单板为基本材料，以回收塑料为粘结体，采用特定的工艺制造而成。2009 年，杨光发明了一种利用大豆蛋白胶生产的新型无甲醛人造板，并由山东阳谷森泉板业有限公司生产。烟台万华生态板业股份有限公司生产的零甲醛禾香板，是采用以 MDI 为主要原料的生态黏合剂，将农作物秸秆黏合而成，可以用于家具、地板等建筑板材。木塑板是由木粉、稻壳、秸秆等废植物纤维材料与 PE、PP、PVC 等热塑性高分子材料和加工助剂等，混合均匀后经挤压、模压或注射成型工艺制成的高科技绿色环保材料，兼有木材和塑料的性能与特征，具有防火、防水、防腐蚀、耐潮湿、吸声、环保等优良特性，能替代木材和塑料使用，主要用来加工木塑墙板、木塑地板、木塑桌椅及家具门片芯

材等。PE 木塑板使用最为普遍，占木塑复合材料总量的 65%。奥地利的一家公司把木材切割成小块，然后和光纤波导管依照一定的顺序粘在一起，设计出了透光木材，目前主要用于室内装潢设计。

铝塑板是一种利用不燃无机物或无机物填充高分子材料作芯层，铝合金涂层作面材，通过特殊工艺制成的内外墙装饰材料，耐候耐污、易安装、性能优良、可循环利用，多用于机场、大型场馆、剧院等标志性建筑。按表面涂层材质的不同，铝塑板可分为氟碳板、PU 板、丙烯酸板和粉末涂料板，氟碳板是耐久性、机械性和化学性最为优异的板材。铝单板加工简单，应用广泛，但缺乏刚性，用铝量大；在两层铝板之间，粘夹铝箔做成的蜂芯，即为铝蜂窝板，广东顺德红岛实业有限公司 2005 年获得铝面辊涂花纹蜂窝板的专利，并引用航空微真空复合技术，连续生产出多规格的蜂窝板。水性陶瓷铝板，又称搪瓷平板，2009 年由北京普隆金属装饰材料有限公司将水性陶瓷涂料涂装在铝板上制成，具有造型美观、防火、阻燃、耐污染性好、耐老化等特点，属于新型绿色环保产品，适用于内外墙面，尤其适用于地铁和车站等公共空间的墙、柱等耐磨、抗划伤易损部位的表面装饰。该产品克服了陶瓷瓷砖易脱落、强度不高的缺点，也克服了玻璃幕墙光污染、爆裂的缺点及氟碳铝板强度低、耐老化性能差的缺点，是目前公认的地铁工程的最佳装饰材料之一。

（5）胶粘剂类　主要有壁纸胶粘剂、墙布胶粘剂、塑料地板胶粘剂、竹木专用胶粘剂、瓷砖大理石胶粘剂、PMMA 胶粘剂、塑料薄膜胶粘剂、防水片材胶粘剂等。

（6）玻璃类装饰材料　主要有夹丝玻璃、压花玻璃、饰面玻璃、玻璃锦砖、玻璃砖、镭射玻璃、彩印玻璃、雕刻玻璃等。

玻璃砖装饰外墙一般适用于房屋高度 24m 及 24m 以下（基本风荷载 0.55kN/m^2）和抗震设防烈度 7 度及 7 度以下的地区。

（7）陶瓷类装饰材料　主要有釉面砖、墙地砖、大型陶瓷饰面砖、陶瓷锦砖、陶瓷壁画等。

（8）装饰石材类　主要有天然大理石、天然花岗石、人造大理石、人造花岗石、水磨石、其他人造装饰石材等。

（9）吊顶装饰类　主要有石膏装饰吸音板、塑料装饰吊顶板、玻璃装饰吊顶板、珍珠岩吸音装饰板、矿棉吸音装饰板、玻璃棉吸音装饰板、铝合金装饰吊顶板、彩色钢板装饰吊顶板等。

7.2 装饰材料的研究与应用现状

7.2.1 国外装饰材料的研究与应用现状

欧、美、日等工业发达国家的装饰装修材料花色品种多，可选性强，重视研究市场和顾客的心理。

1. 地面用装饰材料

（1）化纤地毯　是美国家居地面装饰中应用最广、最受欢迎的一类产品，其具有绝热、防潮、防噪声等多项功能，约占地面铺贴材料的 70%。家庭装饰中通常采用 4m 宽满铺地毯，飞机场候机厅、博物馆展示厅、商贸中心等公共场所通常采用块状地毯。

（2）仿木纹、仿瓷砖图案的弹性卷材塑料地板　在美国家居装饰、飞机场候机室、专业超级市场及博物馆等公共建筑中应用较广。

（3）实木地板　具有纹理清晰、耐磨损、硬度高、隔声等优点，主要用于客厅、书房、走廊等处的地面铺设。

（4）强化木地板　近年来在美国的销售量逐渐增加，主要用于首层地面的铺设。

（5）陶瓷墙地砖　在美国家居装饰中的用量也在逐年增加，主要用于厨房和卫生间的地面、墙面、厨房工作台面、壁炉的周边和炉前的地面等处，但较少用于建筑外墙。

（6）大理石、花岗石地板　在欧美国家家居装饰中较为少见，偶尔用在壁炉周围或厨房配餐工作台面，主要用于宾馆、饭店、高级百货商场、艺术馆、博物馆等公共建筑的地面装饰。

（7）木塑复合材料　从 2012 年至今，欧洲木塑复合材料产业总体呈上升趋势，2012 年欧洲木塑复合材料的 67% 被用于制作地板。北美地区的木塑复合材料市场需求量最大，其次是中国、欧洲和日本。

2. 墙面装饰材料

（1）内墙涂料　是美国家居内墙装饰中广泛使用的一种饰面材料，约占内墙装饰材料的 60%，主要用于传统住宅木质外饰面的涂饰。美国建材市场上出售的内墙建筑涂料主要是乳胶漆和水溶性涂料。

（2）壁纸、墙布　因具有花色图案多、装饰功能好、施工简单、价格适中等优点，是美国居民乐意采用的一种内墙面装饰材料。壁纸、墙布有向多功能方向发展的趋势，出现了防污染、防菌、防蛀、防火、隔热、调节湿度、防 X 射线、

抗静电等不同功能的墙纸，发展较快的是织物墙纸和天然材料作面层的墙纸。

（3）建筑外墙涂料　欧美等发达国家已有 90% 的建筑外墙采用高级涂料，丙烯酸酯类、PU 类、硅溶胶和氟树脂类约占建筑涂料的 75%。在美国的建筑外墙涂料中，丙烯酸系树脂涂料占 60% 左右，PVAc 树脂涂料占 30% 左右，其他树脂涂料如 PU、环氧树脂系涂料约占 10%；日本的建筑涂料以苯乙烯－丙烯酸、醋酸乙烯－丙烯酸树脂为主，外墙重视单层、复层弹性涂料。

（4）PVC 塑料外挂墙板　是美国住宅外墙装饰广泛使用的一种新型挂贴材料，具有轻质、抗冲击、阻燃、寿命长等特点，可形成坚固、美观、防水的外墙饰面。

（5）金属或镀金属的墙面复合材料　这也是国外装饰材料的发展方向之一。金属表面经阳极化或喷漆处理，可以得到不同色彩，外墙采用不锈钢装饰墙板，立面庄重，质感强；卫生间墙面采用不锈钢马赛克，赋予使用空间全新立体感；墙面贴铝合金板，装饰效果好，安装简单，成本低，使用寿命长。

（6）微晶玻璃　日本是亚洲地区开发微晶玻璃最早的国家，主要用烧结法生产微晶玻璃装饰板，目前已约有 1/3 墙面装饰采用微晶玻璃板。

（7）吊顶装饰材料　国外吊顶装饰材料的主要品种有矿棉吸声装饰板、玻璃棉吸声装饰板、金属吊顶装饰板等；门窗品种主要有塑料窗、木质窗、 铝合金窗、实心木质门、高密度纤维板模压门、钢板泡沫塑料夹心门等。

（8）绿色装饰材料　是采用清洁生产技术生产的有利于人类健康的装饰材料，如植物纤维墙纸、无增塑剂的 PVC 塑料门窗、经过化学处理的防霉壁纸、日本研制成功的“调湿墙体”等。美国科学家设计了“除倦地板”，可以促进人体血液循环，缓解人体疲劳。

总体来说，国外的装饰功能土木工程材料呈现出以下几个主要的发展趋势：① 努力发展可自己动手进行家居装饰的材料，如小桶装涂料、半成品门窗、组合式卫生设备等；② 努力发展各种新型节能装饰材料和技术，如美国科特玻璃功能膜公司开发出的能阻挡 99% 太阳紫外线和 79% 太阳能的玻璃功能膜；美国索斯威尔技术公司在两块玻璃中间放置镀有金属或金属氧化物的聚酯薄膜制成的新型节能玻璃，可使原有双玻隔热能力提高 50%；③ 积极发展各种复合装饰材料和技术，如木塑复合地板、强化木地板、铝箔泡沫塑料夹芯板、外墙外保温系统等；④ 重视发展装饰装修材料的标准化、系列化、配套化和通用化特性。

7.2.2 国内装饰材料的研究与应用现状

20 世纪 60 年代以前，国内建筑物内外墙的装饰材料主要为石灰浆和大白粉；60 年代中期，我国实现 PVAc 乳液的工业化生产，PVAc 乳胶涂料应运而生；70 年代，聚乙烯醇水玻璃内墙涂料（106）和聚乙烯醇缩甲醛涂料（107）研制成功并应用于内墙装饰，并在 80 年代得到大量应用和发展；同时我国开始研制并进口装饰装修材料，发展至今已有 100 多个门类、5 000 多种花色，并不断向高性能、复合化、预置化、天然材料及智能多功能方向推进，如已出现的纳米光催化净化空气涂料、自清洁外墙涂料、抗菌涂料、负离子清新涂料、热反射型保温隔热涂料等。

在内墙用装饰材料方面，草墙纸、麻墙纸、纱绸墙纸凭借变温、保温、驱虫、保健等优势正逐步替代有机墙纸；新型乳胶漆以无毒气散发、防霉、色彩丰富等特点，逐渐替代含有挥发性有机化合物的 107 胶、106 涂料、仿瓷涂料等；可选用的内墙水性涂料主要是有机硅丙烯酸树脂、水乳型 PU 等，也可选择 PVC 环保型壁纸、纯纸壁纸、天然材质壁纸、木纤维壁纸等无毒无害类材料；TiO_2 涂层自洁式瓷砖，当受紫外线照射时会产生破坏有机物的活性氧，可在数小时内与附在表面的油垢发生化学反应，不仅能清除油垢，还能杀菌除臭。

在外墙用装饰材料方面，我国建筑涂料的应用率还不到 60%。国内很多地区已制定了限制使用外墙砖、推广涂料应用的政策，鼓励开发使用环保型或低毒性的丙烯酸、有机硅改性丙烯酸、紫外光固化自交联新型丙烯酸涂料、水性 PU 涂料、氟碳漆、仿石仿砖涂料、外墙刮砂型弹性质感涂料及多功能外墙涂料等。水性双组分 PU 涂料在国外已实现工业化生产，其硬度高、柔韧性好、耐水性及耐候性强，具有一定的发展优势和前景。氟碳涂料具有仿铝塑板的装饰效果，可用于钢铁、塑料、玻璃钢、水泥或瓷砖表面，不受形状限制，耐久性好，且呈现出金属质感。仿石装饰材料包括水刷石、真石漆、岩片漆及水包水型多彩外墙涂料等，真石漆装饰效果酷似大理石、花岗石，水包水型多彩外墙涂料在我国建筑外墙涂料装饰市场上逐渐受到认可，主要用于住宅、办公楼、商场、学校、医院等的外墙装饰；仿砖涂料主要采用石英彩砂涂料，通过批刮或喷涂施工并进行仿瓷砖粘贴分格而得，将在未来几年得到较快发展。外墙刮砂型弹性质感涂料具有较强的附着力、遮盖力和柔韧性，主要用于砖墙、水泥砂浆、砂石等基面装饰。纳米屏蔽紫外线外墙涂料属于智能化装饰材料，具有良好的耐候性、保色能力、涂膜亮丽性和耐水、耐碱、耐洗刷性，是高档别墅常用的

环保型外墙涂料。具备防水防渗、高耐沾污、防碳化、保温隔热等多功能的涂料及粉末涂料是今后外墙涂料的主要发展方向。

外墙装饰材料还可选用金属百叶、格栅、网状金属幕墙、金属压花复合保温装饰板、轻型钢结构粉煤灰发泡（ASA）板、GRC 外墙装饰构件、PVC 外墙挂板、石材铝蜂窝复合板、低碳板、木纹水泥板等绿色材料，也可将纳米改性涂料、纳米改性色浆、单组分无溶剂 PU 防水涂料、岩棉板外墙外保温系统等应用于外墙立面装饰。我国室内吊顶装饰主要选用轻钢龙骨纸面石膏板、硅钙板等；也可选用绿色木质人造板材或者绿色非木质人造板，如以麦秸为原料制成的饰面板，质轻、坚固耐用，防蛀、防水，机械加工性能好，无游离甲醛；还可将天花板抹平后刷水性涂料或贴环保型壁纸。地面装饰材料以陶瓷地砖及木地板（天然木地板、复合木地板等）为主。近年来，我国木塑地板的用量不断增大，预计 2015 年将超过北美，跃居世界第一。

人造石以其成本和性能优势，逐渐成为我国工程装修的主要装饰材料。21 世纪初，以广东佛山荣冠、云浮富云等为典型代表的民营树脂型人造大理石企业迅速发展，树脂型人造大理石被广泛用作室内地面、墙面装饰材料等。2005 年树脂型人造石英石进入我国，2006 年国内开始生产石英石，2007 年推出国产石英石，主要用于橱柜台面、地面等。树脂型人造实体面材自 20 世纪 90 年代初由美国杜邦及富美家公司等引入国内市场，主要以 PMMA、不饱和聚酯树脂等有机高分子材料为基体制成，可用于厨房台面、卫浴设施及酒店宾馆的柜台、护墙、护套等处的装饰装修。因树脂型人造石耐高温、耐火性差，因此不能用于温度偏高的灶台及防火等级要求较高的公共场所，也极少用于家庭装修。减少树脂的含量，增加无机物的含量，使人造石的硬度、强度、耐老化性得到提高，并制备双色、多色、拼花、超薄型、多样化的人造石成为该研究领域关注的焦点，而研发发光型人造石、负离子功能人造石、防静电人造石、水晶石等将成为人造石的发展主流。

我国对微晶玻璃装饰材料的研发始于 20 世纪 80 年代中后期，已经取得突破性进展。广东茂名中辰集团有限公司采用武汉工业大学的技术，年产微晶装饰平面板和弧面板 20 万 m^2，有 30 多个花色品种，且成品率较高；清华大学研制的微晶玻璃装饰板已在内蒙古华孚玻璃厂投入生产，产品质量达到国际先进水平；武汉工业大学、清华大学、中科院上海硅酸盐研究所等单位已成功地掌握了用粉煤灰、煤矸石、金属尾矿、黄河泥沙及工业废弃物等作为基本原料生产微晶玻璃装饰板的先进技术。2015 年一批 1.5mm 超薄、可视、防火微晶玻璃在晶牛微晶集团股份有限公司下线。该产品具有耐高温、防紫外线、高透热、高绝缘、不导

电、不导热、只导磁等特性，必将在航天航空、高铁、军事、医疗防护、高炉、工业等领域起到巨大的提升作用。

我国未来的装饰材料将更加注重节能、环保，向无毒无害、多功能及智能化发展：①着重发展水性涂料，降低有机挥发物的含量，并向阻燃、热反射、高抗沾污性、高弹性、高耐候性等方向发展；②发展微晶玻璃，替代传统人造石材及玻璃饰品；③创新木材胶粘剂，摈弃甲醛，生产真正的绿色环保的木质板材；④将纳米科技运用到装饰建材中，如开发自洁抗菌防霉涂料、抗菌玻璃、抗菌釉面砖、抗菌卫生陶瓷等；研制纳米导电涂料；利用纳米材料屏蔽紫外线的功能提高 PVC 塑钢门窗的抗老化黄变性能等。

7.3 装饰材料产业现状

1982 年我国第一家专业装饰公司成立。1998 年，瑞典的宜家家居、英国的百安居、法国的乐华梅兰、德国的欧倍德等世界建材零售商纷纷进入中国市场。我国一边从国外引进装饰装修材料生产设备和生产技术，一边研发出许多新型装饰装修材料，目前一些产品已经具有一定的规模，在数量方面能基本满足我国当前装饰装修材料工程的需求。至 2013 年，我国墙布和壁纸的年生产力达 4 亿 m^2、塑料管道为 25 万 t、塑料地板为 1.6 亿 m^2、化纤地毯为 6 000 万 m^2、建筑陶瓷为 9 亿 m^2、塑料异型材为 20t、建筑卫生陶瓷为 5 000 万件、建筑涂料为 80 万 t、型材为 40 万 t。花色品种已经发展到 4 000 多种。

我国新型装饰材料的品种、档次及用量等和国外工业发达国家相比，都存在着很大差距。我国所使用的地面装饰材料中陶瓷类材料约占 55%，花岗石、大理石类材料约占 13%，其他属于木地板、塑料地板类；而发达国家的有机类地面装饰材料（化纤地毯、塑料地板等）约占 80%，无机类地面装饰材料（陶瓷墙地砖、大理石、花岗石地面等）约占 20%，这说明我国的地面装饰材料仍处于能耗高、生产效率低的状况，需要不断去改进与发展。

我国生产装饰装修材料的企业规模一般较小，相当比例的企业注册资金在 100 万元以下，每个批次的材料产量不高，且由于工艺和设备的限制，前后批次的材料不可能完全一致；较小的生产规模导致生产成本较高，市场售价高，与进口材料相比价格优势不明显；同时，企业自主研发能力较弱，多数依靠国外的引进，材料款色旧、档次低、配套性差。如胶粘剂在我国应用广泛，2012 年我国胶粘剂用量占国际市场的 30%，但整个胶粘剂市场基本由几家跨国公司控制，包括德国汉高集团，美国 3M 公司、道康宁、巴斯夫，日本日东电工及 HB Fuller。根据

中国胶粘剂工业协会预测，2011—2015 年胶粘剂密封剂产量和销售额的平均增长速度分别为 10% 和 12% 左右，预计到 2015 年胶粘剂密封剂产量达到 717 万 t，销售额达到 1 038 亿元，其中结构胶粘剂产量和销售额分别达到 73 万 t 和 230 亿元，产量较大的主要是环氧树脂胶、有机硅胶和 PU 胶。

材料的节能化、无害化已经成为装饰材料的必然发展趋势，利用有限的自然资源生产材料，并使用多功能装饰材料改善人类生活环境，促进人与自然的和谐发展，成为装饰材料行业发展的主题。

第 8 章　力功能土木工程材料

力功能土木工程材料是指在满足材料基本力学性能的同时，具备一系列与力相关的特性功能的材料。常用的力功能土木工程材料主要包括耗能减震功能材料、特性拦阻系统材料及耐磨（冲）和防滑功能材料。

8.1　耗能减震功能材料

耗能减震技术是在土木工程结构物的某些部位（如支撑、剪力墙、节点、连接缝或连接件、楼层空间、相邻建筑间、主附结构间等）设置耗能部件或耗能（阻尼）器，通过摩擦、弯曲（或剪切、扭转）弹塑（或粘弹）性滞回变形消耗地震能量，以减小主体结构地震反应，达到减震控震的目的。

土木工程中使用的耗能减震功能材料，根据基材不同可分为金属类、形状记忆合金类、橡胶类及水泥基类耗能减震材料，还包括减缓高速铁路列车行驶震动和噪声的高速铁路板式无砟轨道材料。

8.1.1　金属类耗能减震材料

金属类耗能减震材料主要包括软钢、低屈服点钢和铅，其原理是利用金属材料屈服时产生的塑性滞回变形来耗散能量。软钢（热轧钢筋）有明显的屈服点，破坏前有明显的预兆（较大的变形，即伸长率），属塑性破坏；屈服点相对较低的钢，具有优良的深冲性能和深拉延性能；铅具有较高的柔性、延展性和良好的塑性变形能力，且变形后能结晶恢复、无应变硬化。这些特性使得上述金属材料具有很好的耗能性，适合被开发为减震耗能器件。

1972 年，Kelly 等首次提出利用金属耗能器减小结构的地震反应。近年来，

金属耗能减震技术的研究与应用日趋广泛。金属耗能器是一种耗能性优越、构造简单、制作方便、造价低廉且易于更换的耗能减震装置，他既可作为隔震支座或隔震系统的耗能单元或限位装置，又可单独用于土木工程结构中作为耗能装置，提供附加阻尼和刚度，具有广泛的应用前景。国内外学者、工程技术人员先后开发了多种类型的金属耗能器，主要有：扭转梁耗能器、弯曲梁耗能器、受弯圆梁耗能器、U 形钢板耗能器、钢棒耗能器、蜂窝状耗能器、圆环（方框）耗能器、双圆环耗能器、加劲圆环耗能器、X 形和三角形加劲耗能装置、低屈服点钢剪切板耗能器、铅耗能器、铅粘弹性耗能器、无粘结支撑等。

金属耗能器已在许多新建和需抗震加固的土木工程中得到应用，如无粘结支撑在日本、中国台湾和美国都得到推广应用；低屈服点钢阻尼器、蜂窝状阻尼器等金属耗能器已在日本多幢建筑中得到应用。

8.1.2 形状记忆合金类耗能减震材料

形状记忆合金（Shape Memory Alloy，SMA）具有形状记忆效应、超弹性、良好的阻尼及弹性模量随温度改变等特性，通过改变预埋入结构的 SMA 的温度，可改变结构局部或整体刚度及阻尼，达到减震的目的，且 SMA 延性大、疲劳寿命长，在结构振动控制系统设计中具有很大的吸引力。利用 SMA 的超弹性效应和高阻尼特性可制作 SMA 减震隔震装置，抑制结构在地震荷载下的响应，同时产生足够的回复力使结构恢复到变形前的状态；利用 SMA 的形状记忆效应和弹性模量随温度变化的特性，可对结构实施主动控制。

土木工程中应用最广的是 Ni-Ti、铜基和铁基 SMA。1972 年，SMA 首次被用于土木结构的振动控制技术。随后各种 SMA 阻尼器的研究工作陆续展开，包括：SMA 的材料特性和滞回模型研究；SMA 在桥梁减震中的应用与研究；不同功能机理 SMA 阻尼器的性能试验、装有 SMA 阻尼器或 SMA 线的钢框架结构试验研究；SMA 在结构抗震加固中的应用研究等。SMA 的特殊性能，使其在土木结构抗震、减震中有着广阔的应用前景。Manos 等对两个不同刚度砖柱的顶端加设不同的 SMA 连接，模拟地震输入试验，结果表明加设 SMA 耗能器的模型，地震反应峰值均较不加设 SMA 耗能器时小；与自由砖柱相比，带 SMA 耗能器的模型抗震能力提高 20% ～ 25%，刚度较弱墙柱底部节点抗震能力提高 75%，较强墙柱底部节点抗震能力提高 55%，这种提高作用对于有弹性、弹塑性连接的墙柱更加明显。李惠等通过弹塑性时程分析程序研究了 SMA 耗能减震装置的设计参数对结构地震反应的影响，给出了参数的合理取值范围。

8.1.3 橡胶类耗能减震材料

橡胶是具有可逆形变的高弹性聚合物材料，室温下富有弹性，在很小的外力作用下能产生较大的变形，除去外力后能恢复原状，适合作减震耗能材料。橡胶用于土木工程耗能减震的原理是：橡胶水平柔性形成的柔性隔离层吸收或散耗地震能量，阻止或减少地震能量向土木工程结构物上部结构传递，使整个土木工程结构物自振周期延长，从而减小土木工程结构物上部结构对地震的反应，最终达到减少地震对土木工程结构物上部结构破坏的目的。土木工程用减震缓冲器中常用的高衰减橡胶材料包括二烯类橡胶、二烯类橡胶与沥青的混合物、高衰减热塑性弹性体、高衰减有机硅橡胶、聚氨酯橡胶、丙烯酸酯橡胶、高弹性环氧类树脂、丁基橡胶等。

1966 年美国率先在阿巴尼大厦中使用隔震橡胶支座，随后，日本、法国、新西兰和我国也相继在一些重要建筑物中使用隔震橡胶支座。实践证明，这些使用隔震橡胶支座的建筑物能经受强烈的地震考验，如在 1994 年 1 月的美国洛杉矶大地震和 1995 年 1 月的日本阪神大地震中，采用叠层隔震橡胶支座系统的建筑物显示出优异的抗震效果，不仅建筑物未倒，而且里面的设施也未被破坏。已有研究表明：采用橡胶支座的顶层建筑消能减震的效果一般为 10% ～ 40%，不仅可用于旧房的抗震设防，也可用于新建房屋的减震；不仅可用于多层，也可用于高层，特别是利用隔热层减震，可作为房屋抗震的多道防线之一，且不会影响房屋的使用功能，是一种较理想的减震方法。已建成的基础隔震建筑物中，80% 以上的建筑物采用了叠层橡胶隔震支座系统。自 Sierra Point 高架桥使用铅芯橡胶支座进行抗震加固后，世界上先后有 200 多座桥梁使用隔震技术进行旧桥加固或新建桥梁的抗震设计。我国从 1965 年开始研究桥梁橡胶支座，目前在地震高烈度区建成了多座隔震桥梁。

8.1.4 水泥基类耗能减震材料

水泥基材料在具有固体性质的同时又具有某些流体特征，表现出粘弹性特质，阻尼耗能能力较高。将这种具有一定承载力的粘弹性材料用于结构上，可形成阻尼减振结构，对减轻土木工程结构由于地震作用而导致的损坏具有良好的效果。

许多学者尝试通过在水泥基复合材料中添加高分子聚合物、乳胶、石墨粉、硅粉、柔性纤维、碳纳米管等材料来提高其耗能能力。欧进萍等对聚合物增强水泥砂浆的阻尼特性进行了一系列研究，试验结果表明：掺入胶乳和硅粉能分别提高水泥砂浆的阻尼和强度，而甲基纤维素在提高构件阻尼比和强度方面都有效。胡佳山等

自行设计组装测试系统，研究了集料级配、橡胶和界面处理对环氧树脂混凝土减震阻尼性能的影响，结果表明：在环氧树脂混凝土中，掺入橡胶同时选用偶联剂可提高材料的阻尼；在集料和树脂间引入具有良好粘结的弹性界面层，可以获得阻尼与动弹模量均较好的环氧树脂混凝土。李祝龙等分析了聚合物乳液改性砂浆的阻尼机理，研究表明：聚合物颗粒分散在水泥胶凝材料的连续相内，会在砂浆中形成空间三维连续网状结构，穿梭在硬化浆体中的缺陷与微裂缝之间，形成富有弹性的“铰”结构，既分散了砂浆的应力集中，又增加了变形耗能能力，可克服缺陷或减缓微裂缝在脆性砂浆中的扩散。柯国军等分析了不同的丁苯掺量对混凝土阻尼值的影响，试验结果表明：丁苯胶乳因化学吸附或物理作用，包裹在骨料颗粒和水泥凝胶的表面，将水泥水化产物交联起来，形成结构网，不同程度地改变了粗骨料与水泥石之间的界面，使混凝土的阻尼值增大。Orak 研究了聚酯树脂聚合物混凝土的振动阻尼性能，试验表明：聚合物混凝土的临界阻尼比是铸铁的 4 ～ 7 倍。Yan 等研究了聚烯烃纤维增强混凝土复合材料的阻尼机理，认为该复合材料的阻尼主要来自于两个方面：一是颗粒界面的相对位移及由此引起的界面剥离和界面摩擦；二是拉应力作用下，基体和纤维断面处微裂纹的开展和延伸。Chung 等研究了水泥净浆、水泥砂浆及掺入硅粉、短纤维等的水泥砂浆在不同温度和频率下的阻尼性能，研究表明：砂的加入使水泥砂浆的阻尼性能不及水泥净浆，掺入硅粉后水泥砂浆的存储模量变大，对提高其强度性能是有利的，但降低了水泥砂浆的振动阻尼性能。

随着人们抗震意识的加强、抗震工程设计的规范化及建筑物减震耗能产品的标准化，减震耗能材料的应用将更加广泛。据不完全统计，若新建房屋面积中有 1% 的房屋面积使用减震耗能材料，每年减震耗能材料的销售收入就可达数亿元。此外，减震耗能材料在公路、铁路、地铁等沿线建筑物及水域建筑物的减震方面也会有广泛应用。

8.1.5 高速铁路板式无砟轨道材料

水泥沥青砂浆（Cement Asphalt Mortar，简称 CA 砂浆），是一种由水泥、乳化沥青、细骨料、水和多种外加剂等原材料组成，经水泥水化硬化与沥青破乳胶结共同作用形成的一种新型有机无机复合材料。它以乳化沥青和水泥共同作为结合料，可在内部形成水泥水化物和沥青裹砂立体网络，刚度和强度比普通沥青混凝土高，但是比水泥混凝土低，刚柔并济，以柔性为主，兼具刚性，可用来铺设板式无砟轨道道床。CA 砂浆填充于厚度约为 50mm 的轨道板与混凝土底座之间，可起到支承轨道板、缓冲高速列车荷载与减震等作用，其性能

的好坏对板式无砟轨道结构的平顺性、耐久性、列车运行的舒适性与安全性及运营维护成本等有着重大影响。目前，我国使用的水泥沥青砂浆有两种，用在CRTS I 型板式无砟轨道上的 CRTS I 型 CA 砂浆和用在 CRTS II 型板式无砟轨道上的 CRTS II 型 CA 砂浆。

我国第一条应用 CRTS I 型 CA 砂浆的高速铁路是哈大线，第一条应用 CRTS II 型 CA 砂浆的高速铁路是京津城际客运专线，我国已建成的京沪、武广、郑西、沪宁、宁杭等高速铁路都采用 CA 砂浆。虽然通过这些路段的铺设实验取得了一定的实验数据和相关经验，但是我国 CA 砂浆研究仍处于起步阶段，在 CA 砂浆耐久性、力学性能等方面研究不足，更缺乏适合我国具体轨道环境的 CA 砂浆性能规范。当前，国内参与 CA 砂浆研制和技术开发单位较少，且技术水平参差不齐，国内 CA 砂浆设计技术的理论研究和实践工程应用与国际水平相比都存在一定的差距。

8.2 特性拦阻系统材料

当受到外界冲击载荷时，泡沫混凝土可通过结构中泡孔的变形、坍塌、破裂、泡壁摩擦等各种形式耗散能量，有效吸收外界的冲击能量，因此可被用作特性拦阻系统（Engineered Material Arresting System，简称 EMAS）材料。EMAS 由泡沫混凝土以数十厘米的厚度铺设在飞机跑道延长线的地面上，形成拦阻床，其宽度与跑道一致，长度在数十米到一百多米之间，飞机一旦冲出跑道进入其中，泡沫混凝土在机轮的碾压下破碎，吸收飞机动能，让飞机逐渐减速并最终停止在拦阻床内，保证飞机和机上人员的安全。

EMAS 在美国应用比较广泛。美国联邦航空局与 ESCO（Engineered Arresting Systems Corporation）公司首次开发了泡沫混凝土飞机道面拦阻系统，并于 1999 年 5 月在美国肯尼迪国际机场的一条跑道上进行了实验性铺装，效果良好，铺设后曾多次避免了飞机冲出跑道事故的发生。截至 2012 年 6 月，美国共有 42 个机场 63 条跑道铺装了 EMAS。中国是亚洲唯一铺装了 EMAS 的国家，也是在美国境外铺装的第一例。中国九寨黄龙机场在 2006 年 5 月进行的二期扩建工程中增加了 EMAS 的铺装，分别在跑道南北两端铺设长 51.85m、宽 52m 和长 88.7m、宽 52m 的 2 个拦阻区域。2012 年 7 月 12 日，由中国民航科学技术研究院研发，具有完全自主知识产权的 EMAS 正式通过中国民航局的合格审定并获得工程应用批准，是世界上第二个取得政府民航主管机构批准的 EMAS。

EMAS 具有可靠性高、受气候环境影响小、易修复等特点，且能够提供与标

准跑道端安全区相同的安全保障，节省机场用于跑道端安全区的土地面积，对机场正常运行的影响低。

8.3 耐磨（冲）和防滑功能土木工程材料

耐磨（冲）和防滑都是土木工程材料的表面功能特性，且某些情况下是密切相关的。

8.3.1 耐磨（冲）功能土木工程材料

耐磨（冲）性是指材料表面对荷载和介质磨损作用的抵抗能力。耐磨（冲）功能土木工程材料主要用于地面、路面以及水/海工结构等。按照材料性质的不同，可将常用的耐磨（冲）功能土木工程材料分为水泥基、树脂基、花岗岩和水磨石。后两者属于装饰材料，这里不做详细介绍。

1. 耐磨（冲）水泥基材料

水泥基材料的耐磨（冲）功能特性主要通过四种途径实现。①原材料采用高强度和高硬度的骨料、纤维填料（如钢纤维、聚丙烯纤维等）、矿物掺合料或纳米粒子（如纳米 TiO_2、纳米 SiO_2）等，以强化水泥基材料的表面层，提高其耐磨（冲）性。②在混凝土基面上均匀铺撒表面硬化剂，使混凝土表面形成高效耐磨层。③在混凝土基面涂刷无机化合物密封固化剂。其作用机理是密封固化剂与混凝土中的 CaO 发生化学反应，生成 $2CaO \cdot SiO_2$ 和 $3CaO \cdot SiO_2$，并进一步与水化合生成水化硅酸钙或雪硅钙石胶，雪硅钙石胶在混凝土的气孔中生成晶状体，可有效封堵混凝土的毛细孔使其整体结构致密，进而提高其表面耐磨（冲）度。④掺加高分子合成乳液或其他表面活性物质，改善混凝土的微观结构，使混凝土更密实，减少微裂缝的形成和发展；同时由于聚合物相对弹性模量极低，可使混凝土的宏观韧性得以提高，从而提高其耐磨（冲）性能。

水泥基耐磨（冲）功能材料的制备、性能、机制研究及应用已广泛开展。刘卫东等研究了不同品种纤维混凝土的抗冲刷磨蚀性能，并进行了路面纤维混凝土的耐磨损实验，研究表明：玄武岩纤维混凝土的抗冲击磨损能力最佳，PP 纤维混凝土既能抗冲刷磨蚀又能抗冲击磨损。李祝龙等研究了不同剂量的丁苯橡胶乳液对水泥混凝土及水泥砂浆耐磨蚀性能的影响，发现丁苯胶乳可明显改善水泥混凝土及水泥砂浆的耐磨蚀性能，随着聚灰比的增加，耐磨蚀性能逐渐提高。王彦平等选用 JNF 型抗冻硅溶胶、氟硅酸镁 / 氟硅酸铝和高效混凝土密封固化剂对混凝土表面进行处理，同时涂装了水性硅丙乳液、环氧树脂 /PU 和 PU 涂料作为风

蚀防护层，以提高混凝土的抗风砂冲刷磨损性能。杨志昂等采用铸石砂石骨料配制混凝土，以提高水工混凝土的耐磨蚀性能。此外，在水泥基材料中添加耐磨颗粒添加剂（如非金属、金属及合金颗粒等）可制备应用于厂房、停车场、大型超市、人行道，机场跑道以及车行道等的耐磨地面或路面。

2. 耐磨树脂基材料

耐磨树脂基材料是由特种树脂与适当溶剂、填料、固化剂等复合制备而成。树脂基体材料主要包括环氧树脂类、PU 类和丙烯酸（交联类）类。树脂基材料的耐磨性不仅和树脂本身有关，主要取决于填料。填料的增强作用主要体现在：改性摩擦表面和提高承载能力，增加树脂基体的剪切强度。目前，能够提高树脂耐磨性的填料主要包括刚性粒子（如石墨粉、滑石粉、石英粉、碳化硅、纳米粒子等）和纤维（碳纤维、玻璃纤维、有机纤维等）。

耐磨树脂基材料主要用于制备耐磨地坪。用于制作地坪的耐磨树脂基材料在美国、日本、法国等已有六七十年的历史，产品技术和工程技术已相当成熟。由于树脂基耐磨地坪具有耐磨、耐腐蚀、抗冲击及无接缝、质地坚实、保养方便、维护费用低廉等优良特性，自 1999 年率先在北京地区引进后，逐步被认可并广泛应用于厂房、车间、仓库、物流中心、超市、展馆、车库、停车场等场合的耐磨地面。

土木工程结构物存在大量的表面，这些表面在荷载或环境介质的长期作用下会逐渐退化甚至失效，耐磨（冲）功能土木工程材料可以有效改善土木工程结构表面的粗糙度和完整性，防止土木工程结构整体经久失效，提高耐久性。

8.3.2 防滑功能土木工程材料

防滑涂料是土木工程中应用最多的防滑功能材料，将其涂刷在路面上，可提高路面防滑系数。普通路面潮湿状态下的防滑阻力为 45（BPN 值），而新铺装防滑涂料后潮湿状态下路面防滑阻力可达 78（BPN 值），潮湿状态下磨损后的防滑阻力可达 76（BPN 值）。相同条件下，布设防滑涂层的路面防滑阻力比普通路面高 68%。

防滑阻力是指物体与结构物涂层之间的摩擦力，防滑阻力的大小与涂层表面的光滑程度密切相关。可选择摩擦系数高、耐磨性能好的树脂基料防滑涂料；或在涂料中添加耐磨防滑骨料，增大涂料表面的摩擦阻力。PU 改性环氧树脂是目前使用效果较好的防滑涂料。黎阳等的研究表明：防滑骨料的种类和粒径是影响抗滑系数和摩擦系数的最重要因素。

根据使用的树脂种类不同，可将防滑涂料分为丙烯酸、PU、环氧树脂、氯

化橡胶、醇酸防滑涂料等。根据涂料的组成不同，可分为单组分、双组分和多组分防滑涂料。防滑骨料作为防滑涂料的重要组成部分，根据材质不同，可分为合成有机类和无机类骨料。常用的合成有机类防滑骨料有 PE、PP、PU 树脂粒子及橡胶粒子等惰性高分子材料， 无机类防滑骨料有硅石粉、铁铝氧石、石英砂、玻璃珠、金刚砂、碳化硅、结晶养护铝等。

欧美等发达国家对防滑涂料的相关研究起步早、时间长，技术较为成熟，在实际工程中已有广泛应用。国外在路面防滑涂料的无溶剂化、水性化和无机化等方面的研究取得了突破，如美国 AST 中心研发了无溶剂型 PU 路面防滑涂料，固体含量能达到 100%；美国 TDA 公司通过在涂料中添加可参与低级环氧、PU 聚合物反应的 Alumoxanes 纳米材料制成无机 / 有机杂化树脂，涂料的柔韧性增强，提高了防滑性和耐磨损性。

我国在路面防滑涂料技术方面的研发始于 20 世纪 80 年代，2000 年以后才开始广泛应用于北京、青岛、上海等城市道路和一些公路的交通事故多发路段。国内的科研人员也对路面防滑涂料开展了一系列研究，周健等采用聚环氧双丙烯酸酯与聚醚聚氨酯制成防滑涂料，可明显改善路面的抗滑性和耐磨性，实测指标接近国外同类产品。但国内的路面防滑涂料研究远落后于国外，多数产品仍被国外企业垄断，实际工程应用也较少。

2008 年，交通部颁布《路面防滑涂料》和《彩色路面防滑涂料》等相关交通行业标准，对推动防滑路面的应用起到重要的作用。英国伦敦交通部门研究表明，路面采用防滑涂层后，总交通事故发生率降低 51%，其中潮湿路面的交通事故发生率可减少 67%。我国具有发达的交通网络，随着道路建设要求的提高以及对交通安全的重视，防滑涂料优越的防滑性能、便捷的施工方法和后期保养维护等众多优点，将使其具有无比广阔的应用前景。

第 9 章　电功能土木工程材料

土木工程中使用的电功能材料主要用于防静电、融雪化冰、结构健康监测传感及振动控制，包括导电、电热、压电和电流变功能材料。

9.1　导电功能材料

土木工程中应用的导电功能材料主要是指导电混凝土。它是一种利用导电材

料部分或全部取代骨料，按照普通混凝土的制备工艺形成的多相复合材料，不仅使混凝土具有良好的导电性，且极大地改善了混凝土的力学性能。

按照基体材料的不同，可将导电混凝土分为无机类（如水泥导电混凝土、水玻璃导电混凝土等）、有机类（如沥青导电混凝土、树脂导电混凝土等）和复合类（如聚合物导电混凝土、浸渍导电混凝土等）。

20 世纪三四十年代，苏联、德国、加拿大、美国、英国等开始探索混凝土导电的可能性；50 年代末，苏联制造出以水玻璃和水泥作为基材的导电混凝土；70 年代，美国、加拿大等为解决除冰盐造成的混凝土腐蚀问题，在采用阴极保护措施的过程中，开展了对导电混凝土的研究和应用；Banthia 等于 1992 年研究了碳纤维－钢纤维增强水泥基材料的导电性；1995 年，Xie 等使用碳纤维及碳系颗粒材料（包括炭黑、焦炭等）制成导电混凝土； Baldwin 等于 1998 年制备出电阻率、抗压强度、抗弯强度和密度等各项性能指标分别为 1 ～ 40Ω·cm、≥ 30MPa、5 ～ 15MPa 及 1 450 ～ 1 850kg/m^3 的导电混凝土。Yehia 和 Tuan 等于 1999 年和 2000 年采用 0.15 ～ 4.75mm 粒径范围的钢屑和 4 种不同长径比（18 ～ 35）的钢纤维（长度为 6.5 ～ 38mm）研制出新型导电混凝土；唐祖全等于 2001 年对不同导电相（碳纤维、钢纤维、钢渣和石墨）混凝土的电阻率特性进行了研究；Yehia 和 Tuan 等复合使用石墨、碳质产品及钢屑，研发出新型导电混凝土；钱觉时等人采用风淬钢渣制备出导电混凝土；高宇星等于 2011 年利用碳纤维和石墨研制出导电沥青混凝土。

导电混凝土因既具有导电性能，又具有普通混凝土技术和性能上的优势，在土木工程领域有着巨大的潜在应用前景。目前主要用在中大型变压站中，不仅可以大大节省变压站金属的消耗和安装接地装置的劳动力消耗，还可以提高接地装置的可靠性和耐久性。导电混凝土也被广泛用于钢筋混凝土结构的阴极保护，将直流电源正极与导电混凝土相连接，负极与被保护的钢筋连接，使电流通过连续的导电混凝土介质，到达钢筋表面从而使钢筋发生阴极极化。与其他钢筋阴极保护技术相比，导电混凝土可长期可靠地抑制钢筋腐蚀，施工方便，并且成本低，寿命长。

9.2 电热功能材料

电热功能材料是指利用电流热效应（即焦耳效应）放出热量的材料或材料复合体。在土木工程领域中应用最广泛的电热材料是电热混凝土、发热电缆和电热管。

9.2.1 电热混凝土

电热混凝土的体积电阻率应在 10 ～ 100Ω·cm 范围内。目前用于制备电热混凝土的导电介质材料主要是碳类和金属类。在碳类电热混凝土的电热性能研究方面，20 世纪 60 年代，苏联学者利用炭黑做导电组分尝试制备了水泥基复合材料，并对其电热特性进行了初步探究；Xie 等利用碳纤维及碳系颗粒材料（包括炭黑、焦炭等）制作了电热混凝土，并将其应用于道路融雪除冰等方面；孙明清等研究了碳纤维水泥基复合材料的电热特性，并将其与碳纤维混凝土的塞贝克效应结合，研制出具有温度自诊断和自适应功能的碳纤维混凝土板结构模型；李仁福等利用石墨导电相制成导电水泥砂浆，并试用于室内地面取暖；唐祖全等于 2001 年对不同导电相（碳纤维、钢渣、石墨）电热混凝土的融雪化冰效率进行了持续研究，发现碳纤维混凝土通电后的发热功率稳定，可用于混凝土路面、桥面和机场跑道等结构的融雪化冰；高宇星等研究了掺加碳纤维和石墨的导电沥青混凝土的电热效应。

在金属类电热混凝土的电热性能研究方面， Xie 等于 1996 年研究了钢纤维水泥基复合材料（同时掺入钢屑）的焦耳效应，并在实验室实现了融雪化冰；Wen 等发现在水泥基中添加 0.4%（质量分数）的钢纤维和 0.5%（质量分数）的碳纤维及 15% 的硅灰，可使混凝土具有高效的电热性能； Yehia 等提出利用钢纤维、钢屑提高混凝土的电热性，并展开桥梁路面除冰的实际工程研究；敖灶鑫等对钢渣石墨导电沥青混凝土的电热性能进行了研究。

冬季降雪、冰冻是导致交通事故和影响道路使用寿命的主要原因之一。电热混凝土可以代替金属发热体用于高速公路、机场跑道等的融雪化冰。当对混凝土通电使路面温度升至 0℃以上时，路面上的冰雪融化成水，路面无积雪、不结冰，可保障道路畅通和行车安全。相比于传统的化学除雪法和机械除雪法，利用混凝土的电热性能融雪化冰环保、节能、高效。同时，电热混凝土也可以用作采暖的电热材料，应用于动植物养殖场及温室建造等。

9.2.2 电热管和发热电缆

在土木工程领域，电热管/发热电缆主要用于道路结构关键交通节点的融雪化冰。在极端天气时开启电源，电热管/发热电缆产生热量，热量通过混凝土传导至路面和冰雪层，在较短时间内融化冰雪。电热管/发热电缆用于路面融雪化冰在北欧等国家已有应用，但未见有系统的实践经验、研究报道及相关标准。李炎锋、武海琴等人分别于 2005 年和 2006 年开展了该项技术的应用研究，围绕发热电缆融雪化冰的一些关键问题，进行了相关的实验工作和理论分析。2007 年，

哈尔滨文昌高架桥首次尝试运用电缆加热法除雪融冰，取得了良好的效果。

9.3 压电功能材料

土木工程材料的压电功能是指其受到压力作用时会在材料两端面间出现电压，具体工作原理是：压电晶体中正负离子排列的不对称和晶胞正负电荷重心的不重合会形成电偶极矩，这些电偶极矩在某些区域内方向一致成为电畴结构（图6-9-1）。电畴在晶体上杂乱分布，其极化效应相互抵消，材料内极化强度为零，但被直流电场极化后的电畴极化方向趋于同一方向，当外力作用到压电材料上引起变形时，材料内部正负束缚电荷的间距变小，极化强度也变小，原来吸附在电极上的自由电荷有部分被释放，出现放电现象，称为正压电效应。在压电材料两极外加一定强度电场，正负电荷间距变大，极化强度也变大，电极上又吸附部分自由电荷而出现充电现象，电荷在电路中移动可对外输出机械能，称为逆压电效应。压电效应原理如图6-9-2所示。

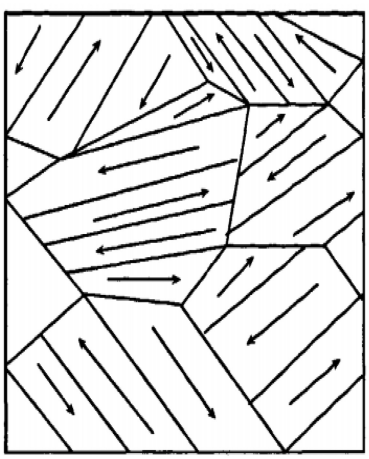


图6-9-1　电畴结构

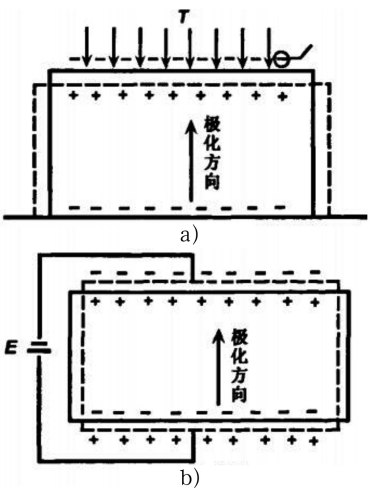


图6-9-2　压电效应原理

a) 正压电效应　b) 逆压电效应

土木工程中使用的压电功能材料主要是压电陶瓷、压电薄膜和水泥基压电复合材料。

9.3.1 压电陶瓷

压电陶瓷是一种能够将机械能和电能相互转换的功能陶瓷材料。压电陶瓷主要包括含铅压电陶瓷和无铅压电陶瓷两类。在含铅压电陶瓷材料中，二元系锆钛酸铅（PZT）是国内外学者研究的主要对象，可以通过改变PZT组分或变换外界

条件对其电物理性能在很大范围内进行调节，如三元系、四元系等，以适应不同需要。PZT 压电陶瓷具有响应快、可靠性好、精度高、成本低、结构简单等优点，在土木工程中具有广泛的应用前景。

国内外主要将压电陶瓷用于土木工程结构的健康监测和损伤识别。孙威等研制开发了一种新型、适用于混凝土结构的压电陶瓷传感器件——“智能骨料”。他既是混凝土结构健康监测的智能元件，又具有普通骨料的功能，很好地解决了压电传感器与主体结构相结合时出现的各种实际问题。该系统具有良好的性能，为进一步开展健康监测研究奠定了试验基础。

在结构震动控制中，主要利用压电陶瓷的逆压电效应将其作为驱动器。压电陶瓷驱动器有多种形式，如刚性片、柔性片、叠层式压电陶瓷堆、粗纤维复合驱动器和压电陶瓷摩擦阻尼器等。可将压电陶瓷驱动器粘结在结构高应变区域的表面，或者将其植入结构中形成组合结构。压电材料的高阻抗特性使其适用于测量动态力学，而不适用于测量静态力学，因此可将压电陶瓷传感器用于对结构冲击荷载的识别和定位及对结构系统的动态监测。Song 等利用埋入钢筋混凝土梁的压电陶瓷传感器来监测高速路桥受超载货车撞击的响应，可监测出由撞击所产生的混凝土疲劳损伤及撞击力的大小，评估其安全性，且随着冲击力的增加，传感器的输出响应有呈线性增大的趋势。

利用压电陶瓷材料还可以进行集能发电，应用场地基本不受限制，且发电装置成本低，制作简单，可大规模制作。以色列技术研究院在普通沥青路面中植入大量压电晶体，通过汽车驶过时的压电转换来发电，理论上这些植入沥青的压电材料能使用至少 30 年，可用于任何大流量的道路。据测算，一段不到一英里的四车道路面，假设车流量为 1 000 辆 / 时，可产生 100 ～ 400kW 的电力。此外他们还设计了一种用于人行道的路面发电系统，行人走在用这种材料铺成的路面上，每步可产生 0.000 2J 的能量，累积起来可供路灯照明使用。我国目前共有高速公路 4.1 万 km，如若全部应用此技术，一年最多将发电 1 436 亿 kW • h。因此这种压电发电技术的发展前景相当可观。

9.3.2 压电薄膜

20 世纪 70 年代，聚偏氟乙烯（PVDF）压电薄膜在日本问世；到目前为止，世界上只有少数先进国家生产。PVDF 压电薄膜是一种柔软、质轻、高韧度塑料薄膜，可根据需要制成各种形状、厚度的元件。与微电子技术结合，能制成多功能传感元件。按照其组成成分可将 PVDF 压电薄膜分为 AIN 压电薄膜、ZnO 压电薄膜、PZT 压电薄膜三类。PVDF 压电薄膜压电常数大、频响宽、机械强度好、

耐冲击、质轻柔韧、价格便宜，可代替压电陶瓷使用，且可用于压电陶瓷不能使用的场合，是土木工程结构健康监测的理想元件。

Knapp 等对电阻应变片、PVDF 压电薄膜及加速度传感器进行了应变传感特性的对比，研究结果表明：高灵敏度 PVDF 压电薄膜适用于低应变状态的测量。Cuhat 和 Davies 运用模态测试原理，将 PVDF 压电薄膜作为模态滤波器测量了振动梁的应变并且采用实验的方法设计了 PVDF 薄膜形状传感器。Audran 等利用 4 片方形 PVDF 压电薄膜片测量了等强度梁的应变，并将 PVDF 的输出电信号转换成结构的声强来标定测试的误差信号。Morikawa 和 Gama 等在等强度梁上模拟了裂纹损伤，将压电传感器和驱动装置布设在损伤周围，采用传递函数和阻抗技术来监测裂纹的萌生，通过测量 PVDF 的电输出来监测不同深度的裂纹损伤。Shirinov 和 Sehomburg 详细地阐述了 PVDF 压电薄膜的制作和设计过程，通过实验探究了 PVDF 的传感特性，指出测量的精确度会受到环境温度和湿度、热电效应和蠕变等因素的影响。王代华等搭建了 PVDF 测量结构振动的处理系统，研究结果表明：PVDF 压电薄膜适用于柔性结构的振动测量。李焰等在单向应变梁上对两种 PVDF 应变片的应变－电荷常数进行了标定，并对一维应力杆中的应变波形进行了测量，得到了较好的测量精度，研究结果表明：PVDF 应变片在动态应变测量中具有很好的应用潜力。具典淑以 PVDF 压电薄膜作为结构监测的传感元件，对 PVDF 的传感机理、传感元件的制作、应变传感及裂纹监测等方面进行了较为系统的研究。实验证明：随着裂纹的萌生和扩展，PVDF 输出信号会产生相应的变化，说明 PVDF 可以捕捉到结构裂纹萌生与发展的瞬时信号，为结构安全评定与损伤定位提供了翔实可靠的信息。孙宇提出了一种利用 PVDF 压电薄膜来测量结构表面裂纹深度的实验方法，采用非接触式静电电压表测量薄膜表面因裂纹张开位移产生的感应电压反推出裂纹张开位移量，具有较高的测量精度，适合在工程上推广使用。

9.3.3 水泥基压电复合材料

水泥基压电复合材料是指以压电陶瓷为功能体，水泥为基体制成的压电功能材料，它与混凝土相容性良好、强度高、耐久性好、感知灵敏度高且制备工艺简单、造价低，适用于土木工程结构性能监测。

按照功能相和基体相的连通方式，可将水泥基压电复合材料分为 10 种基本类型，即 0-0、0-1、0-2、0-3、1-1、2-1、2-2、2-3、1-3、3-3 型。其中研究最多的是 0-3 型、2-2 型、1-3 型水泥基压电复合材料。李宗津等以 PZT 粉末与白水泥复合，用铺展成形方法研制了 0-3 型压电复合材料。Chaipanich 等用 PZT

或铌镁锆钛酸铅陶瓷粉体与普通硅酸盐水泥复合，采用压制成形法制得 0-3 型压电复合材料，与混凝土之间具有良好的阻抗匹配关系；他们还制备了 2-2 型连通方式水泥基压电机敏复合材料，在 0.1 ～ 50Hz 低频率范围内研究了该材料的机电性能和机械性能，并将其运用到混凝土结构中作为自感知驱动器。黄世峰等以硫铝酸盐水泥为基体，铌镁锆钛酸铅陶瓷粉体为功能相，采用切割－填充法制备了 2-2 型水泥基压电复合材料，研究发现：适当的水灰比有助于功能相与基体相有效的接触，从而提高复合材料的压电性能。Lam 等以 PZT 为压电功能组分，普通硅酸盐水泥为基体，在制备 2-2 型水泥基压电复合材料的基础上，通过二次切割制备了 1-3 型水泥基压电复合材料，并且获得了较高的机电耦合系数，证明了该类复合材料作为传感器在土木工程领域中应用的可行性。

利用水泥基压电复合材料对结构进行监测主要有应力－应变法、波传播法、机电阻抗法。与其他压电材料相比，水泥基压电复合材料可以有效地改善压电传感器与混凝土之间的力学及声学相容性，因此在土木工程结构健康监测中具有广泛的应用前景。土木工程结构发生损伤时，其机械阻抗也会发生变化，当将压电材料与结构耦合后，通过对其施加交流电场，压电材料会产生振动，并带动结构振动，在高频范围内，结构的物理变化将引起压电材料的电阻抗变化，通过测量压电材料的电阻抗，便可提取结构的机械阻抗变化信息，从而确定结构的损伤情况。另外，还可利用埋入式水泥基压电传感器对水泥前期水化特性进行监测。

9.4 电流变功能材料

电流变（Electrorheological，简称 ER）功能材料是一种在电场作用下具有流变特性的智能材料。ER 液是在不导电的母液（硅油或矿物油）中添加固体电解质颗粒（无机非金属材料、有机半导体材料、高分子半导体材料）形成的悬浊液。在电场作用下，ER 液能从牛顿流体转变为具有一定屈服剪应力的粘塑性体，ER 液的屈服剪应力随电场强度的变化连续变化，正逆向变化时间在 10^{-4}s 数量级上。因此，ER 液具有反应快、阻尼力大、连续可调等优良特性，是土木工程结构减震控制中高效耗能器和主动、半主动控制驱动器的理想材料。

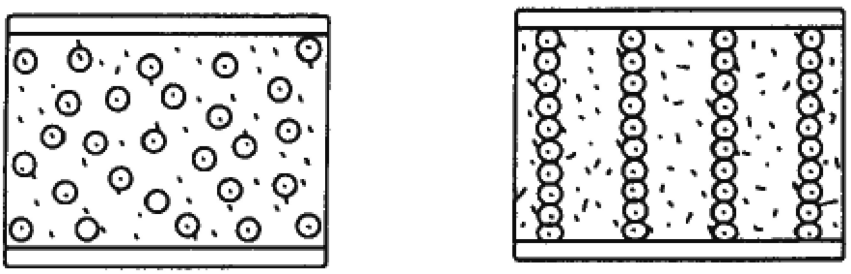
美国和日本在 ER 材料和相关设备方面的研究起步较早。麻省理工学院的 Makris 制作出可用于土木工程结构地震反应控制的足尺 ER 阻尼器。瞿伟廉和徐幼麟等也已制作出 ER 阻尼器，并完成了国内土木工程界第一个 ER/MR 阻尼器对多层框架结构模型振动反应半主动控制的试验。但由于在实际应用中还存在一些技术难题，实际工程中 ER 阻尼器应用极少。

第 10 章　磁功能土木工程材料

目前土木工程中使用的磁功能材料对磁场具有显著的响应，主要用于结构控制和监测，包括磁流变功能材料和磁致伸缩功能材料两类。

10.1　磁流变功能材料

磁流变（Magnetorheological，简称 MR）功能材料是一类在磁场作用下具有流变特性的智能材料，主要包括磁流变液（MR 液）和磁流变弹性体（MR 体）。MR 液是将可磁化的微小极性粒子均匀分散在硅油等母液中制成。MR 液的工作机理是：在强磁场的作用下，MR 液中的悬浮粒子由磁中性变为强磁性，进而使 MR 液由黏度较低的牛顿流体转化成宏观的柱状结构（图 6-10-1），即由液体转变为具有一定剪切屈服强度的粘塑性宾汉姆体，且随着磁场强度的增加，其剪切屈服强度相应增大。MR 体是用橡胶替代 MR 体中的载液制成。与 MR 液相比，其优点是悬浮颗粒不会随时间而沉降，且不需要进行密封。MR 体只能在磁场控制的弹性模量范围中工作，而 MR 液通常工作在屈服后和流动阶段（屈服即颗粒的链状结构被破坏）。



a)　　b)

图 6-10-1　磁流变效应示意图

a）不加磁场时　　b）施加磁场时

20 世纪 40 年代，美国国家标准局的 Jacob Rabinow 首次发现 MR 液。20 世纪 80 年代中后期，MR 材料及其相关装置（主要是 MR 阻尼器）的研究快速发展。在土木工程结构监测和减震控制中，MR 阻尼器既可用做被动耗能阻尼器，又可用做半主动控制作动器，具有结构简单、出力大、调节容易、控制效果好、连续顺逆可调等优良特性，且 MR 阻尼器所需要的能源很低（小于 50W），其工作电

压只需 2 ～ 25V，即使能源中断，仍可作为被动耗能装置（黏滞阻尼器）继续发挥制动作用，具有很强的可靠性。

美国伊利诺伊大学香槟分校的 Spencer 最早用 MR 材料制作了土木工程结构地震反应控制足尺 MR 阻尼器，并用于多层框架结构和相邻建筑结构的地震反应控制，及大型斜拉桥的拉索反应控制。该 MR 阻尼器已经在我国洞庭湖大桥斜拉索的风雨振动控制上应用并取得较好的效果。我国在 MR 材料方面的研究起步较晚，但也取得了很大的进展。欧进萍等在国内率先开展 MR 材料的研究并制作出了最大出力可达 30kN 的 MR 阻尼器。

10.2 磁致伸缩功能材料

磁致伸缩功能材料是指磁化状态改变时，材料尺寸或体积会随之变化的一类智能材料，可通过以下三个方面实现磁致伸缩：①自发磁致伸缩，又称自发形变；②磁场磁化伸缩，又称场致形变；③形状效应。土木工程中应用的磁致伸缩功能材料主要有 Ni 及其合金、PZT 及稀土超磁致伸缩材料。稀土超磁致伸缩材料主要是稀土－铁系金属间化合物，最早于 1974 年由美国 Clark 博士发现。此类材料的磁致伸缩效应约为 Ni 的 80 倍，压电陶瓷的 5 ～ 8 倍，又称为巨磁致伸缩材料（Giant Magnetostrictive Material，简称 GMM），商品名为 Terfenol-D。

磁致伸缩功能材料既可以作为驱动器材料，又可以作为应力 / 应变传感器材料，在土木工程领域具有良好的应用前景。超磁致伸缩材料输出力大、应变显著、工作频带宽、响应速度快、驱动电压低，尤其适用于土木工程振动的主动控制。Yoshiya 及 Masanao 等利用磁致伸缩功能材料开发出可承受 2t 荷载的六自由度减振平台，减振控制后的平台加速度均方值小于 0.008 cm/s^2，仅为地面加速度值的 10% ～ 30%，且可在 0.05s 内消除冲击荷载激起的振动。Ohmata 等采用磁致伸缩材料研制了一款摩擦耗能减震装置，可根据需要对该装置施加不同的电流值，从而使其可以在三个平动和三个转动方向上调整装置的最大摩擦力和扭矩。Bartlett 采用直径为 30mm、长度为 245 mm 的磁致伸缩棒，运用杠杆原理研制了一款小型土木工程用减震装置，可实现 0.5 ～ 6kN 的控制力。Fujita 等在高 3.4m、重 1.6t 的三层框架模型结构上进行了主动控制试验，验证了超磁致伸缩驱动器在框架及类似结构中减震的有效性。我国自行研制生产的 $TbDyFe_2$ 超磁致伸缩棒材，主要技术经济指标已达国际先进水平，最大型号为直径 70 mm，长度 250mm。在磁致伸缩功能材料的加工和理论水平上，我国已经接近或达到国际水平，但在具体的应用方面还与发达国家有很大的差距。

第 11 章　电磁功能土木工程材料

土木工程材料的电磁功能主要是指其对电磁波入射的反射或吸收损耗能力。电磁功能土木工程材料不仅能用于民用建筑物的电磁波辐射防护，还能用于军事掩体的防雷达探测。按电磁防护原理的不同，电磁土木功能材料可分为两类：电磁屏蔽和电磁吸收功能材料。

11.1　电磁屏蔽功能材料

11.1.1　电磁屏蔽功能材料的定义

用于土木工程中的电磁屏蔽功能材料，是指在土木工程结构位置（如建筑物表层、墙体结构、地面等）通过屏蔽体阻止或衰减电磁波的传输，削弱被屏蔽区域与外部的电磁波能量传递，从而有效降低电磁辐射干扰的一类材料。

电磁波屏蔽程度通常用屏蔽效能（Shielding effectiveness，简写为 SE）来表示，单位为分贝（dB）。屏蔽效能越大，电磁衰减的程度越高，其屏蔽机理以反射损耗机制为主。

11.1.2　电磁屏蔽功能材料的研究和应用现状

用于土木工程中的电磁屏蔽功能材料以水泥基电磁屏蔽材料为主，其他电磁屏蔽功能材料主要包括电磁屏蔽玻璃、电磁屏蔽涂料和木基电磁屏蔽材料等。

1. 水泥基电磁屏蔽材料

水泥基材料因内部含有多种金属氧化物，是较理想的电磁屏蔽材料基体。水泥基电磁屏蔽材料 SE 主要取决于水泥基体材料的电导率，电导率越高，其 SE 越好；当 SE 达到 30dB 时，其在土木工程中的应用才具有实际意义。因此，国内外在水泥基电磁屏蔽材料方面的研究主要集中在通过添加导电填料提高电导率方面。

金属材料的电导率高，是最早应用于水泥基材料的屏蔽介质。在水泥基材料中掺入一定量的金属材料可提高其电导率和磁导率，从而使水泥基材料具有一定的电磁屏蔽功能。20 世纪 90 年代初国外就开始研究电磁屏蔽水泥混凝土。Chung 等的研究表明：在混凝土中掺入直径 0.79mm、长度 3.18cm 的钢回形针，体积掺量为 5% 时的电磁屏蔽效果比掺网状钢丝要好，且对混凝土的强度无影响。陈杨如等在水泥基材料中分别掺入质量分数 30% 的微米级银粉、

铜粉、镍粉，试样在频率 100kHz ～ 1.5GHz 时的平均 SE 分别为 12.47dB、10.71dB、9.51dB。水泥基材料的强碱环境决定了其使用的金属粉末必须具有耐腐蚀性，而且填充量要达到水泥质量分数的 30% 以上才能获得较好的屏蔽效果，但填充量过大会导致水泥基材料的力学性能下降，影响实际应用。金属纤维在水泥基材料中更容易通过相互搭接形成导电通道，因此比金属粉末具有更高的 SE。当频率一定时，不锈钢纤维的长径比越大，水泥基的电磁屏蔽效能越高。谭宏斌等在水泥基材料中掺入占水泥质量分数 1.5%、直径 0.18mm、长 4 ～ 5mm 的不锈钢纤维，所得试样在频率为 8GHz 时的 SE 达 42dB。Wen 等在水泥中掺入体积分数为 0.9%、直径 8μm、长 6mm 不锈钢纤维，试样在 1.5GHz 时的 SE 达 65.5 ～ 77.1dB。Xiong 等在水泥中掺入体积分数为 5%、直径 8μm 的镍纤维制成厚为 10mm 的试样，在频率为 100kHz ～ 1GHz 时 SE 平均值达 45.9dB，最大值可达 47.8dB。

碳系材料导电性能良好，成本低廉，且在水泥基体中性能稳定、分散性好，是制作水泥基电磁屏蔽材料的一类优异填料。Fu 等将直径 0.1mm，体积分数为 0.34% 的细碳丝掺入水泥中，制成厚度为 4mm 的试样，在 1 ～ 2GHz 时的 SE 达 30dB，但其机械性能较差。Cao 等将粒度为 200 目、体积分数为 0.52% 和 1.02% 的炭黑掺入到水泥中制成厚度为 4.4 ～ 4.8mm 的试样，在 1.5GHz 频率时的 SE 分别达到 45dB 和 49dB，其反射衰减约 2 ～ 3dB。Micheli 等研究发现碳纳米管的掺量和板的厚度对电磁波的衰减具有重要的影响，碳纳米管掺量为 3% 的 15cm 厚的墙板的电磁屏蔽效能值超过 50dB。

除上述研究较为广泛的金属、碳系水泥基电磁屏蔽材料外，其他已研究的水泥基电磁屏蔽材料如表 6-11-1 所示。

表 6-11-1　水泥基电磁屏蔽材料的屏蔽效能

研究者	屏蔽介质	掺量	试样厚度/mm	频段	屏蔽效能/dB
康青	铜螺线圈手形体	3 圈	8	10kHz ～ 1.5GHz	30 ～ 60
王普照	煤渣	质量分数 20%	40	8.5 ～ 11GHz	20 ～ 36
黄少文	超导电炭黑和废轮胎钢丝	导电炭黑和钢丝质量分数分别为 9% 和 1.3%	8	100kHz ～ 1.5GHz	＜ 29
谭宏斌	硅灰	质量分数 30%	40	8.5 ～ 11GHz	30.25 ～ 31
Cao	火山灰	质量分数 35%	4.3	1 ～ 1.5GHz	4.16 ～ 6.9
	硅灰	质量分数 35%	4.3	1 ～ 1.5GHz	3.9 ～ 7.2

李博等的研究表明孔径较大的泡沫混凝土具有电磁屏蔽功能。碳纤维泡沫混凝土在 0 ～ 100MHz 频率范围内，SE 随着频率增加而迅速降低；在 100 ～ 1 500MHz 频率范围内，SE 随着频率增加而增加。

上述研究的水泥基电磁屏蔽材料所屏蔽的电磁波频率几乎在几十赫兹到几吉赫兹内，主要用于防止电磁信号的泄露和外部的电磁干扰，其对电磁波的屏蔽效果较好，并逐渐被应用到实际建筑中。如日本通过在混凝土中掺入碳纤维研制出的预制板已成功应用在 9 层大楼的屏蔽围护结构上；美国的五角大楼在建造过程中也使用了电磁屏蔽混凝土材料。水泥基电磁屏蔽材料还可用于发射台、基站、微波站、EMC 实验室、高压线下建筑物等。

2. 其他电磁屏蔽功能材料

业界针对其他电磁屏蔽材料如电磁屏蔽玻璃、电磁屏蔽涂料和木基电磁屏蔽材料，也开展广泛的研究。

电磁屏蔽玻璃主要有三种形式：一是由两片（或多片）玻璃或导电膜玻璃、PVB 胶片和经特殊处理的金属丝网在高温高压下采用夹层工艺制造的特种玻璃；二是在玻璃表面上镀制金属薄膜，制成具有电磁屏蔽功能的玻璃；三是夹金属丝网和镀金属薄膜相结合的玻璃。电磁屏蔽玻璃用于家居和办公建筑，既可以进行采光和通气，起装饰作用，又可以有效屏蔽高频电磁波。电磁屏蔽玻璃在国内外均有研究。日本旭硝子玻璃公司研制出内侧镀有高导电金属的电磁屏蔽玻璃，可有效遮挡室外电磁波的入侵，使电磁辐射减少到 0.1% 甚至 0.001%。

电磁屏蔽涂料用于建筑物的外墙体时，可防止室外电磁杂波透射，也可以用于建筑物的内墙体、顶棚、地面、门窗和家具等，吸收来自室内各方向的电磁波，防止杂波在室内的乱反射。除了开发镍系、银系、铜系和碳系电磁涂料外，国内外主要致力于开发复合型导电涂料，并通过与纳米技术结合，进一步提高涂料的屏蔽效能，屏蔽的频率和范围更广，对人体无刺激，对环境无污染。

木材与一些具有屏蔽效果的材料复合可制成木基电磁屏蔽材料，是一种可回收利用的环保新型电磁屏蔽材料，研究和应用较多的主要有填充型、表面镀金导电型和高温碳化型。如中国林科院木材工业研究所选择镍粉、石墨粉、不锈钢纤维和黄铜纤维为导电单元，制成功能胶合板，黄铜纤维填料的胶合板 SE 值能达到 35dB。

11.2 电磁吸收功能材料

11.2.1 电磁吸收功能材料的定义及原理

电磁吸收功能材料是指能够吸收、衰减入射电磁波能量，并通过材料的介质损耗使电磁能转换成热能或其他能量的一类材料。与电磁屏蔽功能材料不同，电磁吸收功能材料的工作机制以吸收损耗为主。与电磁屏蔽相比，电磁吸收可以避免电磁波反射二次污染。

电磁吸收材料的吸波性能一般用介质对电磁波的反射系数 R 来表示，R=0 时代表材料不发生电磁反射，吸收电磁波的能力最强。

11.2.2 电磁吸收功能材料的研究和应用现状

在土木工程中，对电磁吸收功能材料的研究较少，且主要集中于在水泥基体中掺入不同的吸波剂制备水泥基电磁吸收材料，以提高水泥基体的电损耗和磁损耗方面。按照吸波剂电磁损耗机理的不同，可分为四类：铁氧体填充水泥基、导电粉体填充水泥基、纤维填充水泥基以及新型吸波剂填充水泥基电磁吸收材料。

1. 铁氧体填充水泥基电磁吸收材料

铁氧体在低频下具有良好的吸波效果，其吸波损耗机理主要为铁磁共振吸收，具有较大的磁损耗角。国外早在 20 世纪 90 年代就对铁氧体在混凝土中的应用展开过研究。日本在这方面研究较早，他们开发的以 Mn-Zn、Mg-Zn 铁氧体为吸波剂的混凝土幕墙材料，对 90 ～ 450MHz 电磁波的吸收可以达到 -5dB。TDK 公司研制的厚度为 5.3mm 的镍锌铜铁氧体吸波材料在 130 ～ 540MHz 内对电磁波的衰减为 -10dB。熊国宣等以氧化铁、氧化锌和碳酸锰为原料制备锰锌铁氧体电磁吸波材料应用于水泥基材料中，当质量分数为 35% 时，其吸波性能最好，8 ～ 12GHz 频率范围内，反射率均小于 6dB。钢渣中含有大量铁的氧化物，戴银所等利用钢渣制备的复合水泥材料表现出较好的吸波性能，在 13 ～ 18GHz 内反射率小于 -8dB 的吸收带宽为 5GHz，最小反射率达 -12dB。也有研究采用铁砂来制备铁氧体吸收剂，发现在 8 ～ 18GHz 内最小反射率为 -30dB，但是这种吸收剂主要依靠共振吸收，吸收带宽较窄。一般在制备铁氧体填充水泥基电磁吸波材料时，只要控制好铁氧体的粒度和添加比例，就可以使水泥保持较高的强度，完全满足一般土木工程的需要。

2. 导电粉体填充水泥基电磁吸收材料

导电粉体填充水泥基电磁吸收材料的作用机理是：通过填充导电粒子，增强材料的电阻损耗，提高吸波效能，多采用碳系材料。Cao 等对焦炭填充水泥基复

合材料的吸波性能进行了研究，试验结果表明：在水泥基体中添加部分焦炭粉末之后，材料在 1.0 ～ 1.5GHz 频段内的吸波性能为 -4 ～ -2dB。Dai 等通过研究炭黑填充水泥基材料的吸收性能发现，炭黑能够提高复合材料的相对介电常数和损耗因子，当炭黑的质量分数为 2.5% 时，复合材料的最小反射率为 -20.3dB。刘顺华等对炭黑 /EPS/ 水泥分层复合吸波材料的吸波性能进行了研究，他们在水泥中添加 EPS 与纳米级的炭黑颗粒，做成具有良好吸收特性的吸收层，复合到一起做成分层吸波平板，在 8 ～ 18GHz 频段内的反射率都低于 -8dB，最小反射率可达 -17dB，具有很好的吸收效果。刘成国等设计了以纳米炭黑为吸收剂的新型水泥基墙体材料，在 8 ～ 18GHz 频段内的吸收能力为 -17 ～ -7.5dB，在 18 ～ 26.5GHz 频段内吸收能力为 -15 ～ -10dB。值得注意的是，在掺电阻性超细粉时，粉体的加入量不宜过高，否则会造成入射电磁波的严重反射从而降低吸收性能。

3. 纤维填充水泥基电磁吸收材料

纤维有较大的长径比，在很低的掺量下即可通过搭接形成导电网络，使水泥基材料产生较好的吸波效果，并可增强水泥基材料的强度，常用的有碳纤维、钢纤维等。日本的东洋玻璃公司利用碎玻璃和不锈钢纤维开发出一种装潢材料，对 2.45GHz 的电磁波有 -8dB 的吸收效果，可以有效抑制室内电磁波的多次反射；该公司还利用铁氧体、碳、导电纤维甚至是介质材料等为吸波剂生产了一系列吸波材料，产品的吸波频率 30 ～ 4 000MHz，吸收性能可达到 -20dB。欧进萍等在水泥砂浆中掺杂钢纤维及碳纤维，碳纤维可以提高水泥砂浆的高频吸收性能，而钢纤维则对低频、高频范围内的吸收性能均有所改善，适当的纤维长度和体积含量是提高砂浆吸收性能的决定因素。戴银所等研究了异形钢纤维在水泥净浆中的电磁吸收性能，1 ～ 18GHz 的吸波性能优于 -6dB，且不受养护时间影响，说明异形钢纤维在土木工程材料中具有潜在的电磁吸收性能。

4. 新型吸波剂填充水泥基电磁吸收材料

除上述传统吸波剂外，一些新型吸波剂也逐渐被引入水泥基电磁吸收材料中，如手性材料、纳米材料、导电高分子材料和矿物材料等。康青等首先提出了手性吸波混凝土的研制方案，并制备了手性吸波混凝土，为混凝土的高吸波性、高屏蔽性及宽频性的研究开辟了新途径。熊国宣等研究了纳米 TiO_2 作为微波吸收剂掺入水泥基材料中的吸波情况，发现纳米 TiO_2 的小尺寸效应、表面效应和量子尺寸效应使得纳米 TiO_2 与水泥复合材料在高频段体现出更好的吸波性能，当纳米 TiO_2 掺量为 5% 时，在 12.5 ～ 18GHz 频率范围内复合材料的反射率基本小

于 -6dB，最小反射率达 -16.34dB。Guan 等发现水泥基多孔复合材料中 EPS 的填充率为60%、样品厚度为20mm时的反射率最小，在8～18GHz范围内，小于-10dB的带宽达 6GHz，在 18GHz 最小反射率达 -15.27dB。黄煜镔等发现粉煤灰具有吸波性能是由于富集在其表面的各种微细氧化铁晶体，高铁粉煤灰水泥基复合材料在 -8GHz 波段范围内具有吸波性能，最小反射率为 -13.01dB。

随着电子电气行业的快速发展，电磁辐射已成为继大气污染、水污染和噪声污染之后人类生活环境中的第四污染源。此外，未来存在电子军事战争的潜在可能性。作为人类生存的载体，传统土木材料已不能满足军事和民用领域更高层次的要求，研制“高屏蔽、强吸收、宽频段、低成本”的电磁功能土木工程材料不仅可以减小电磁辐射污染带来的威胁，保障人类的身体健康，还可以防止军事电子设备、数据站等设备的数据泄露和雷达、指挥所等军事建筑的暴露。电磁功能土木工程材料的研究将是未来土木工程领域的研究热点和重要发展方向。

第 12 章　智能土木工程材料

智能土木工程材料是基于耗散结构理论而提出的“活材料”概念，是按照仿生学方法并采用各种先进复合技术实现复杂材料体系的多功能复合系统。自其概念被提出以来，便以强劲的势头飞速发展。

12.1　智能土木工程材料的定义及分类

智能土木工程材料是指能够感知土木工程结构物以外的外界环境条件或内部状态发生的变化，并且能够对此变化进行分析、处理、判断，自动做出适时、灵敏和恰当的响应，具有自感知、自诊断、自调节、自修复等智能特性的新型土木工程材料。智能土木工程材料在使用过程中表现出如下特性：①当材料受到外部刺激时，可感知并识别外界（或内部）的刺激强度，如核辐射、光、电、热、应变、应力等，表现出自感知、自诊断功能；当外部刺激消除后，能够迅速恢复到原始状态，表现出自修复功能；②对外界刺激条件反应灵敏；③能够按照设定的方式选择和控制响应；④具有驱动功能，能够响应外界变化。

根据智能特性，智能土木工程材料可分为：自感知土木工程材料，自调节土木工程材料，自修复土木工程材料、光催化自清洁土木工程材料以及仿生智能纳米界面土木工程材料。

自感知土木工程材料通常以混凝土或 FRP 筋等为基体，通过导电介质等的加入使自身的应力或温度场的变化与其电学特性产生一定的对应关系，通过测量电学特征即可反映其力学或温度特性变化的一类土木工程材料。主要包括自感知混凝土和自感知 FRP 筋。

自调节土木工程材料主要是指在外界环境变化及遭受自然灾害时，能够通过改变自身某些物理特性来适应环境，调节结构变形、提高结构承载力或控制、减缓结构振动的一类智能土木工程材料。主要包括自调节混凝土、自调节玻璃（即显色玻璃，已在 3.1 中进行介绍）、相变储能温度自调节材料（已在 1.2 中进行介绍）、自阻尼材料（即耗能减震功能材料，已在 8.1 中进行介绍）和湿度自调节材料。

自修复土木工程材料是指当土木工程结构物内部或外部发生损伤时，在没有外界作用的条件下，具有自行愈合和再生功能，恢复甚至提高材料性能的新型土木工程材料。主要包括自修复混凝土和自修复涂料。

光催化自清洁土木工程材料是指通过光催化降解而具有除臭、抗菌等多重功能的智能材料，包括光催化功能陶瓷、纳米 TiO_2 自清洁涂层及纳米 TiO_2 光催化材料。

仿生智能纳米界面土木工程材料是指具有（超）疏水 /（超）疏油功能，在自然条件下能够使表面污染物或灰尘颗粒在重力、雨水、风力等外力作用下自动脱落而保持自身清洁，且具有防污、节水环保等多重功能的智能表面涂层材料。

12.2 智能土木工程材料的研究现状

12.2.1 自感知土木工程材料

自感知混凝土的研究最早由 Chung 等发起，他们于 1993 年研究了碳纤维混凝土的应变、损伤感知性能；毛起炤等先后发现了自感知碳纤维混凝土的三诊断区域特性，建立了力 - 电阻关系模型，并探讨了温度及极化效应对复合材料感知性能的影响；周振君等研究了带有炭涂层的尼龙纤维混凝土的感知性能；韩宝国等用乙炔炭黑和镍粉为填料，研制出具有高应力 / 应变灵敏度的自感知混凝土；Du 等制备了具有良好感知特性的纳米石墨混凝土，并将其运用到混凝土梁构件的变形和损伤监测中。

Kalamkarov 等在 FRP 筋的拉拔成形生产过程中成功将 Bragg 光栅和 Fabry-Perot 光纤传感器埋置在 FRP 筋中。Muto 等将喷洒碳粉玻璃纤维增强塑料埋置在 FRP 筋中，通过电阻变化值确定 FRP 筋的应变，并将其应用于结构裂缝监测

和健康诊断。Bakis 等将低伸长率的具有压阻特性的碳纤维或碳粉与高伸长率的玻璃纤维或芳纶纤维按照一定的比例和方式掺杂在 FRP 筋中，制得新型自感知 FRP 筋。

12.2.2 自修复土木工程材料

自修复混凝土的研究最早可以追溯到 1925 年，Abram 发现混凝土试件在抗拉强度测试开裂后，放置户外 8 年后裂纹愈合，且强度比先前提高了两倍；随后 Jacobsen 等发现混凝土在冻融循环损伤后放置在水中 2 ～ 3 个月，抗压强度可恢复 4% ～ 5%。在此基础上，国内外学者开始关注自修复混凝土的研究，并提出了在混凝土基体中复合含胶粘剂的微胶囊、布设含胶粘剂的光纤或纤维、微生物诱导沉积、电化学沉积、渗透结晶沉积及埋设 SMA 等方式制备自修复混凝土。最近，Schlangcn 等在多孔沥青混凝土中添加钢纤维并用电磁加热机器对这种沥青混凝土路面加热实现裂缝快速愈合，该自愈合方法可使路面寿命提高两倍。英国纽卡斯尔大学学生制造出一种 BacillaFilla 孢子转基因细菌，可用来填补混凝土的细小裂缝，并产生碳酸钙和细菌胶的混合物。

自修复涂料是 20 世纪 90 年代提出的一种智能涂料。自修复涂料主要的应用方法有：可逆化学反应法、微胶囊法和空心纤维法等。White 等将装有环戊二烯二聚体的脲醛树脂微胶囊和催化剂分散在环氧树脂低聚物材料中，制备了胶囊自愈合材料；Martin 等通过腐蚀电位差来控制胶囊内修复剂的释放，制备了性能良好的自修复涂料；Song 等于 2013 年研制了以阳光为催化剂的微胶囊自修复涂料。

12.2.3 自调节土木工程材料

1973 年，Witmann 等首先研究了自调节混凝土的力电、电力效应。20 世纪 90 年代初，日本建设省建筑研究所与美国国家科学基金会合作研制了具有调整建筑结构承载能力功能的自调节混凝土材料；2004 年，Song 等以 SMA 作为驱动器，压电陶瓷作为传感器，通电激励 SMA 使开裂混凝土梁的裂缝闭合，实现了结构的自调节；罗子文将 SMA 布置在混凝土梁体外以取代体外预应力钢筋，形成无粘结 SMA 自调节混凝土梁。同济大学混凝土材料研究国家重点实验室也曾尝试在混凝土中复合电黏性流体（一种在外界电场作用下可产生黏性、塑性和弹性等流变性能双向变化的悬胶液）来研制自调节混凝土材料。

土木工程材料的湿度自调节是利用其自身对水蒸气的自动吸放作用调节室内空气湿度。湿度自调节材料的主要成分是多孔的调湿材料，主要有硅藻土、沸石、海泡石、蛭石、水铝英石、纳米天然沸石粉等。日本最早进行该领域的研究，并

在这方面远远领先于其他的国家。该类材料能满足人的居住或美术馆等建筑对湿度的控制要求，而且调湿过程连续、无能耗。

12.2.4 光催化自清洁土木工程材料

在已有的自清洁土木工程材料中，光催化功能陶瓷和纳米 TiO_2 自清洁涂层的研究刚刚起步，国内外主要对纳米 TiO_2 光催化自清洁材料展开了广泛的研究。20 世纪 70 年代，藤岛昭等首次发现了纳米 TiO_2 的光催化特性，之后纳米 TiO_2 受到了国内外研究人员的广泛关注。国外研究人员通过溶胶－凝胶法制备 TiO_2 薄涂层，并应用在玻璃表面使其具有光催化自清洁效应；2008 年，Euvananont 等通过旋涂、浸涂、丝印技术将溶胶－凝胶前驱体沉积在玻璃表面基材上，制得 TiO_2 光学涂层。2004 年，石玉英等向涂料中加入具有光催化效应的纳米 TiO_2，制得光催化纳米 TiO_2 自清洁涂层；张安杰等于 2012 年以钛酸丁酯、正硅酸乙酯为前驱体，采用溶胶－凝胶法低温制备了具有光催化特性的纳米 TiO_2/SiO_2 复合薄膜。2014 年，北京富思特新材料科技发展股份有限公司基于纳米 TiO_2 光催化材料研制成功光能自洁涂料，在自然光照射下会发生光催化反应，产生活性很高的羟基自由基，可将空气中氮氧化物吸附到涂层表面，通过光催化反应将氮氧化物氧化为无害硝酸盐，不但可消除空气中的污染物，还提高了外墙面漆的耐沾污性能。

12.2.5 仿生智能纳米界面土木工程材料

仿生智能纳米界面土木工程材料以涂层材料涂覆于玻璃、瓷砖或混凝土的表面，可以赋予这些材料疏水、疏油、防雾、防结冰和自清洁等功能。如利用纳米材料双疏机理制备的建筑自洁涂料，具有低表面张力、高强附能力，优良的自洁功能，强劲的抗粉尘和抗脏物的粘附能力，漆膜硬度高且有韧性；耐洗性大于 15 000 次，具有良好的保光保色功能，抗紫外线能力极强，使用寿命长达 15 年以上。

12.3 智能土木工程材料的应用与发展

目前，自感知智能土木工程材料的研究主要集中在传感元件，特别是大规模表面粘附或埋入分布式传感器的制作上，可使结构的重要构件节点或整体具有感知性能。智能驱动土木工程材料的研究主要集中在被动消能减振装置和主动控制的驱动装置上，这类装置出力大、能耗小、反应迅速，将会成为新一代的土木工程结构减振驱动装置。

智能土木工程材料在工程中的应用主要有以下两方面：①将智能土木工程材料融入结构混凝土，使结构混凝土具有自诊断、自调节、自愈合等功能，使普通混凝土变成“机敏混凝土”；②将智能土木工程材料集成到工程结构中，实现结构参数的自我调节，达到减小结构在地震及风载作用下震动响应的目的，使普通结构变成“智能减振结构”。

智能土木工程材料的发展趋势主要集中在以下三方面：

（1）结构健康的实时检测监测与监控　在土木工程结构中埋入集成传感与驱动元件，利用它们构成的网络对结构的裂缝、损伤、疲劳、冲击、缺陷、腐蚀等状态进行实时监测和控制，以保证土木工程结构与基础设施的安全，有效降低维修成本。

（2）形状自适应材料与结构　智能土木工程材料制备的自适应结构既具有承受荷载和传递运动的能力，还兼有监测（应力、应变、裂缝、损伤、温度等）、动作（改变结构内部应力应变分布和结构外形及位置等）和改变结构特性（结构阻尼、固有频率、光学特性、周围电磁场分布）等诸多智能功能。

（3）自适应控制减振、抗震、抗风、降噪结构　在土木工程设计中，结构动力响应，尤其是针对桥梁与高层建筑等大型土木工程结构的抗震抗风问题，一直比较重要。研发应用智能土木工程材料能够实现结构的自适应控制，为其提供重要的解决途径。

智能材料是继天然材料、合成高分子材料、人工设计材料之后的第四代材料，是现代高技术新材料发展的重要方向之一，将使传统意义下的功能材料和结构材料之间的界线逐渐消失，实现结构功能化、功能多样化，它的研制和大规模应用将使材料科学发生重大变革。智能土木工程材料作为智能材料的一个重要分支，可有效提高土木工程结构的安全性、舒适性和耐久性，并保持土木工程结构与环境的协调性，因具有重大的社会意义和经济价值，已成为土木工程领域的研究热点和发展方向。

第 13 章　纳米土木工程功能材料

小尺度可以导致大变化，纳米技术为土木工程材料的可持续发展注入了新的动力，特别是为发展（多）功能土木材料提供了无限可能。纳米土木工程功能材

料已得到世界广泛关注，且进展十分迅速。

13.1 纳米土木工程功能材料的定义和分类

纳米土木工程功能材料主要是指通过纳米材料技术来获得良好功能性能的一类土木工程材料。纳米材料是指粒子平均粒径在 100nm 以下的材料，由于粒子细小，其界面上的原子数多于内部，进而具有小尺寸效应、表面效应、量子效应（宏观量子隧道效应）和界面效应，并由此派生出许多宏观物体所不具备的新异的物理、化学特性。纳米材料以其特有的光、电、热、磁、电磁等性能为土木功能材料开发提供了崭新途径。

目前用于制备纳米土木工程功能材料的纳米材料主要包括纳米无机非金属氧化物（如 SiO_2）、金属氧化物（TiO_2、Fe_2O_3、AgO、ZnO 等）及纳米碳材料（碳纳米管、碳纳米纤维、纳米石墨等）。其中复合纳米材料是目前主要的研究方向。纳米土木工程功能材料按照基体材料及用途的不同，可分为纳米功能涂料、纳米功能水泥基材料、纳米功能陶瓷材料、纳米功能玻璃、纳米功能金属材料以及纳米功能塑料等。

13.2 纳米土木工程功能材料的研究与应用现状

纳米功能金属材料主要是利用纳米技术开发自身防火和防腐的钢材，而纳米功能塑料主要是通过复合纳米材料提高其耐磨性和改善表面的粗糙度。这两部分目前研究与应用还比较少，因此以下主要介绍其他四类纳米功能材料。

13.2.1 纳米功能涂料

纳米功能涂料在土木工程中的应用主要通过两种方式实现：一是在传统的有机涂料中分散纳米材料形成纳米复合涂料，使涂料具有隔热、抗菌、环保、自清洁、电磁屏蔽和耐老化等功能特性；二是将纳米粒子组成的纳米涂层材料涂覆在基体材料表面，进而使基体材料具有某种特殊性能。

1. 透光、隔热功能涂料

纳米材料的粒径远小于可见光的波长 400 ～ 750nm，使得纳米涂料具有较高的透明性；同时纳米填料可以吸收红外线，降低能耗，可以用来制作隔热涂料。黄旭珊等以纳米 ITO（Indium Tin Oxide）为填料制备了透明隔热涂料，其研究表明：纳米 ITO 掺量为 1.5% 时，隔热效果明显，红外线透射率仅为 1.5%，可见光透射率为 86%。

2. 自洁抗菌环保功能涂料

目前土木工程中主要使用纳米金属氧化物来实现涂料的自洁抗菌环保功能。纳米 Ag 具有较强的催化能力，高氧化态的 Ag 具有很强的还原性，可以使周围产生原子氧，而原子氧又具有极强的氧化性可以杀菌，因此 AgO 可以用来制作抗菌涂料。纳米 ZnO 和纳米 TiO_2 为光催化材料，还具有自洁和环保的功能。光的照射可以引起纳米 TiO_2 表面在纳米区域形成亲水性及亲油性两相共存的超双亲性，将其掺入涂料中，制得纳米自洁涂料，可用于医院手术间和病房的墙面、地面等；同时纳米 TiO_2 在波长小于 400nm 的光照下，能诱导光化学反应，从而具有光催化性能，可起到杀菌的作用。纳米 ZnO 在紫外线照射下，有极强的化学活性，能与多种有机物发生氧化反应（包括细菌内的有机物），可用来制备自洁抗菌纳米土木工程功能材料。

3. 电磁屏蔽功能涂料

纳米材料对不同波长的雷达波和红外线具有很强的屏蔽作用，可用来制备频带宽、重量轻、厚度薄的电磁屏蔽涂料。朱国辉等研究了纳米镍粉电磁屏蔽功能涂料的制备；吕明旭等以纳米石墨片为填料、PU 乳液为基体制备了水性导电涂料，该涂料的电阻率仅为 7.5Ω/cm，电磁屏蔽效能为 27dB 左右；冯永成等研究了碳纳米管的管径、长径比和分散方式对涂料电磁屏蔽性能的影响。

4. 耐老化功能涂料

涂料易受到使用环境中的光、热、水分、氧和微生物等的作用而发生老化。光是引起涂料老化的主要因素，尤其是光谱中近紫外光谱段。纳米 TiO_2 的一般粒径为 10 ～ 50nm，这使得纳米 TiO_2 的晶体光学性质服从瑞利散射理论，可透过可见光并会散射波长更短的紫外光，在全部的紫外线区都有滤过功能，可作为紫外线吸收剂。Stamatakis 认为球形 TiO_2 吸收紫外线的最佳粒径为 50 ～ 120nm。纳米 SiO_2 的平均粒径为 10nm，表面积高达 640m^2/g，表面含有大量的介孔，使得纳米 SiO_2 具有界面反射特性，对可见光和紫外线的反射率可达 80% ～ 85%。

13.2.2 纳米功能水泥基材料

将纳米 TiO_2 水泥基材料铺设在公路或停车场路面，可利用纳米 TiO_2 的光催化特性分解汽车尾气，净化空气。纳米金属粉末、金属氧化物及碳纳米管等都是良好的吸波材料，将其掺入到水泥基材料中，可制成具有电磁屏蔽功能的水泥基材料。纳米碳材料、纳米金属氧化物的掺入可提高水泥基材料的导电性、导热性，并赋予水泥基材料应力、应变、温度、损伤或裂纹自感知性能。姚武等研究了碳

纳米管对水泥材料热电性能的影响，发现掺有水泥质量 0.5% 的碳纳米管的水泥基复合材料，热电势率最高增加 260%。Han 等对碳纳米管水泥基复合材料的电学及感知性能进行了比较系统的研究，发现 0.1% 碳纳米管掺量的水泥基材料具有稳定的感知性能。

13.2.3 纳米功能陶瓷材料

在陶瓷釉面或面层中掺入抗菌纳米材料（如 TiO_2、ZnO 等），可制备用于厨房、浴室及卫生间墙地面装饰的抗菌陶瓷釉面砖和卫生陶瓷制品。利用纳米材料的光催化作用可以制成分解汽车尾气的饰面陶瓷砖。利用纳米材料特殊的光电磁特性可制成太阳能陶瓷、远红外陶瓷等，用于建筑物饰面的同时可开发太阳能，调节环境温度。纳米超双亲界面陶瓷材料与水或油的接触角接近于零，具备自清洁和防雾功能。

13.2.4 纳米功能玻璃材料

纳米技术和现代玻璃制造工艺相结合可以生产出自洁抗菌玻璃、隔热玻璃等。自洁抗菌玻璃是利用纳米技术在平板玻璃的表面形成一层纳米材料（主要是纳米 TiO_2）薄膜，使其具有自清洁抗菌功能。当水在 TiO_2 薄膜表面的接触角小于 7° 时，玻璃还具有防雾功能。2001 年，英国首次开发出 TiO_2 光催化自清洁玻璃，并很快推广到欧美等国。玻璃表面涂一层纳米透明隔热材料可改变其隔热性能，并几乎不影响可见光透过性，同时也可以屏蔽红外辐射，吸收紫外线。美国和西班牙的研究人员联合开发了一种嵌入纳米晶体薄涂层的智能玻璃窗，可对可见光和产生热量的近红外光进行选择性控制，通过动态控制照进的光线，可提升居住舒适度并且节能环保。

社会经济飞速发展，各种需求日益复杂化，传统土木工程材料在性能、质量等方面已经难以满足市场的要求。纳米材料的奇特性质为其广泛应用奠定了基础，通过把具有特殊功能的纳米材料与传统土木材料进行复合与嫁接，可以开发出多功能 / 智能、高附加值的新型功能土木工程材料。纳米技术作为一门全新学科必将对传统土木工程材料性能提高和使用范围的扩展产生不可估量的作用，为未来的土木工程行业带来巨大的经济、社会效益。但我国纳米技术和纳米产品仍处于基础研究和应用研究的起步阶段，材料的可靠性、可使用性、制造成本、商品化等问题亟待解决。

结　语

本部分主要对力、电、声、光、热、磁、电磁、防水、防火以及装饰功能土木工程材料，智能土木工程材料和纳米土木工程功能材料进行了系统介绍，试图勾勒出土木工程功能材料领域的宏观轮廓，也描绘出土木工程功能材料各细微分支的来源、研究、应用与发展，同时提供土木工程功能材料领域的最新研究成果以及产业状况和发展战略。

土木工程功能材料应用量大面广，研究与应用空间广阔，无论在土木工程材料领域还是功能材料领域，都占有重要的地位，重要性不断攀升。土木工程功能材料学科是材料科学、土木工程与其他基础学科多学科交叉融合的产物。随着科技的进步与社会需求的提升，土木工程材料正向材料/结构一体化、结构/功能一体化以及多功能/智能化方向发展，其内涵也在不断地扩大，品种不断地丰富。土木工程功能材料对其他相关领域的发展起着引导、支撑和相互依存的关键性作用，是最具推动力的共性基础材料。土木工程功能材料具有极富吸引力、渗透力以及扩展力的产业背景，其发展会联动上下游相关产业，并将会带来土木工程领域一些革命性的突破，可为人居环境的安全性、可靠性、舒适性的提高提供有力支撑与保障，对于推进人类社会的可持续发展以及人与自然环境的协调发展具有重要意义。

参考文献

[1] 施伟，谭毅，曹作暄．隔热材料研究现状及发展趋势[J]．材料导报，2012（S1）：344—347．

[2] 冯坚，高庆福，冯军宗，等．纤维增强 SiO_2 气凝胶隔热复合材料的制备及其性能[J]．国防科技大学学报，2010，32(1)：40—44．

[3] Suryavanshi A K，Swany R N．Development of lightweight mixes using ceramic microspheres as fillers[J]．Cement and Concrete Research，2002，32(11)：1783—1789．

[4] Zalba B，Marin J M，et al．Review on thermal energy storage with phase changes:materials，heat transfer analysis and applications [J]．Thermal Applied Engineering，2003，23：251—283．

[5] 尚建丽，王争军，李乔明，等．界面聚合法制备微胶囊相变材料的试验研究[J]．材料导报，2010，24(3)：71—74．

[6] Ahmad M , Bontemp S A , Sallee H , et al. Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(4): 357—366.

[7] 施韬, 孙伟, 王倩楠. 潜热储能石膏基建筑材料的制备及其储(放)热行为研究[J]. 功能材料, 2009(6): 90—97.

[8] 史巍, 张雄, Juergen D, 等. 相变储能大体积混凝土的控温性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 564—568.

[9] 邓安仲, 庄春龙, 李胜波, 等. 地板采暖系统用复合相变砂浆填充材料研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2): 161—164.

[10] Wu J J, Li C G, Wang D B, et al. Damping and sound absorption properties of particle reinforced Almatrix composite foams[J]. Composites Science and Technology, 2003(63): 569—574.

[11] 钱军民, 李旭祥. 橡塑型泡沫吸声材料的研究[J]. 功能高分子学报, 2000, 13(3): 309—311.

[12] 刘伟伟, 何思渊, 黄可, 等. 孔结构周期调制通孔多孔铝合金及其吸声性能[J]. 材料研究学报, 2009, 23 (2) : 171—174.

[13] 辛锋先, 卢天健, 陈常青. 轻质金属三明治板的隔声性能研究[J]. 声学学报: 中文版, 2008, 35 (4) : 340—347.

[14] 席莺, 李旭祥, 方志刚, 等. 聚氯乙烯基混合吸声材料的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2001 (2) : 129—132.

[15] Ng C F, Hui C K.Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels[J]. Applied Acoustics, 2007: 1—9.

[16] Binici H, Aksogan O, Bakbak D, et al. Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1035—1041.

[17] 傅雅琴, 朱春燕. 增强材料的排列形式对复合材料隔声性能影响的试验研究[J]. 复合材料学报, 2008(2): 68—73.

[18] 吴源华. 智能透明混凝土制品及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[19] 史小丽, 王选仓, 刘昆. 公路隧道反光沥青路面[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009 (3) : 19—22.

[20] Nan S, Chen J S. Engineering properties of concrete made with recycled glass[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 35(4): 259—274.

[21] 陈风晨, 李立寒, 杜鹃, 等. 废玻璃沥青混合料性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 239—244.

[22] Zhao C L, Chen D H, Yuan Y H, et al. Synthesis of $Sr_4Al_{14}O_{25}$: Eu^{2+}, Dy^{3+} Phosphor Nanometer Powders by combustion Processes and Its optical properties [J]. Materials science and Engineering: B, 2006, 133(1—3): 200—204.

[23] 王信刚，叶栩娜，章未琴，等. 水泥基发光材料的发光特性与微观形貌[J]. 南昌大学学报：理科版，2013，37(3)：277—280，286.

[24] 黄韦星，曾和平，余力，等. 储能自发光涂料的研制及性能[J]. 华南师范大学学报：自然科学版，2011(3)：66—70.

[25] 赵廷超，黄尚廉. 光纤传感器用于混凝土结构状态检测的研究[J]. 传感技术学报，1997， 19(3)：248—253.

[26] 费爱艳，李东旭，张毅，等. 聚合物改性建筑防水材料[J]. 材料导报，2013 (9)：76—79.

[27] 吴明. 防水工程材料[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[28] 马洪涛. 聚氨酯硬泡体防水保温层复合屋面的施工[J]. 新型建筑材料，2009 (10)：82—85.

[29] 互动百科. 屋面瓦[OL]. http://www.baike.com/wiki/%E5%B1%8B%E9%9D%A2%E7%93%A6.

[30] 姜英涛. 涂料基础[M]. 北京：化学工业出版社，2004：48—82，217—224.

[31] 沈春林. 中国防水材料现状和发展建议[J]. 硅酸盐通报，2005，24(5)：78—83，124.

[32] 中国防水在线. 创新务实百舸争流，各显风采共襄盛举——记第十二届中国国际屋面和建筑防水技术展览会[OL]. 2014. http://www.jzfsonline.com/roofonline_articles_20140902091426.html

[33] 李永德，杨静. 发展弹性建筑密封材料[C]//21 世纪新型建材绿色建材. 2000：250—252.

[34] 曾运财，郝伟，徐英国，等. 水泥混凝土机场道面新型密封材料的性能与应用研究[J]. 新型建筑材料，2012(8)：68—70.

[35] 王跃林. 硅酮胶二十年发展概览[J]. 中国建筑金属结构，2014 (6) ：32—35.

[36] 邓超. 我国建筑密封材料的现状与发展[J]. 中国建筑防水，2006 (S1) ：34—37.

[37] 刘学贵，刘长风，邵红，等. 新型膨润土遇水膨胀建筑密封材料的研究[J]. 新型建筑材料，2007 (5) ：41—43.

[38] 薛菁，刘晓曦，邹继明. 机场道面新型聚硫氨酯接缝材料应用研究[J]. 新型建筑材料，2011 (5) ：76—78.

[39] 王甫正. 氯氧镁水泥基无机防火板的改性研究[D]. 重庆：重庆大学，2005.

[40] 张文华. 喷射防火材料在我国的发展现状与前景[J]. 新型建筑材料，2003(9)：40—41.

[41] 郝晓玉. 聚丙烯纤维高强混凝土高温后的微观特性及其抗压性能研究 [D]. 太原：太原理工大学，2012.
[42] 陈烜. 环保型耐高温硅酸钙防火材料的研制 [D]. 贵阳：贵州大学，2010.
[43] Giraud S, Bourbigot S, Rochery M, et al. Flame retarded polyurea with microencapsulated ammonium phosphate for textile coating [J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 88: 106—113.
[44] 崔波. 聚合物水泥防火卷材的研究 [D]. 西安：长安大学，2013.
[45] 付若愚，刘学军，张世超，等. 纳米 SiO_2 在钢结构防火涂料中的应用 [J]. 材料科学与工程学报，2005，23(2)：248—251.
[46] Koo JH, Pilato L A. Polymer nano structured materials for high temperature applications [J]. Sampe Journal, 2005, 41(2): 7—19.
[47] 祝磊，杨仁党，韩文佳，等. 蔗渣浆和竹浆制备墙体装饰材料的研究 [J]. 功能材料，2012，43(12)：1622—1626.
[48] 李斯龙. 多功能建筑节能柔性装饰材料楼饰贴（软瓷）的研究与应用 [J]. 中国建材科技，2014，23(3)：33—36.
[49] 耐凉. 硅藻土装修材料走俏日本市场 [J]. 建材工业信息，2004(8)：43—44.
[50] 刘长伟，李汉宇，王美丽，等. 新型绿色环保装修材料水性陶瓷铝板 [J]. 中国建材科技，2012(6)：94—95.
[51] 康尔企业. 我国微晶玻璃应用现状及前景 [OL]. 2011. http://www.wzkanger.com/main/proView.asp?id0=3&id1=17&id2=17&id=391
[52] 吴从晓，周云，王廷彦. 金属耗能器的类型、性能及工程应用 [J]. 工程抗震与加固改造，2006，28(1)：87—94.
[53] 范立础，志强. 桥梁减隔震设计 [M]. 北京：人民交通出版社，2001.
[54] 欧进萍. 结构振动控制：主动，半主动和智能控制 [M]. 北京：科学出版社，2003.
[55] 罗健林. 碳纳米管水泥基复合材料制备及功能性能研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.
[56] 申爱琴，李祝龙，龚俊生，等. 聚合物乳液改性水泥砂浆 [J]. 公路，2000(7)：41—44.
[57] Orak S. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(2): 171—174.
[58] Fu X, Chung D D L. Vibration damping admixtures for cement[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(1): 69—75.
[59] Xie P, Gu P, Beaudoin J J. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(15): 4093—

4097.

[60]侯作富,李卓球.融雪化冰用碳纤维混凝土的导电性能研究[J].武汉理工大学学报,2002,24(8):32—34.

[61]Sun M, Li Z, Liu Q, et al. A study on thermal self - diagnostic and self—adaptive smart concrete structures[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(8): 1251—1253.

[62]沈刚,董发勤.碳纤维导电混凝土的性能研究[J].公路,2005(12):178—182.

[63]武海琴.发热电缆用于路面融雪化冰的技术研究[D].北京:北京工业大学,2005.

[64]孙威.利用压电陶瓷的智能混凝土结构健康监测技术[D].大连:大连理工大学,2009.

[65]具典淑,周智,欧进萍.PVDF压电薄膜的应变传感特性研究[J].功能材料,2004,35(4):450—456.

[66]Li Z J, Zhang D, Wu K R. Cement matrix 2 - 2 pizoelectric composite—Part1. Sensory effect [J]. Materials and Structures, 2001, 34(8): 506—512.

[67]瞿伟廉,袁润章,项海巩.ER智能材料－减震结构体系的研究[J].振动工程学报.1999,6(1):193—201.

[68]汪建晓,孟光.磁流变弹性体研究进展[J].功能材料,2006,5(37),706—709.

[69]隋莉莉,欧进萍.半主动磁流变减震驱动器的工作原理及应用[J].哈尔滨建筑大学学报,2002,6(35):3,9—13.

[70]瞿伟廉.土木工程结构振动的智能控制[J].工程力学,2008(S2),106—116.

[71]樊禹江,王社良,代建波,等.基于打垮空间网架结构主动控制的新型超磁致伸缩材料作动器优化配置研究[J].空间结构,2012,183(9):14—20.

[72]刘顺华,刘军民,董星龙.电磁波屏蔽及吸波材料[M].北京:机械工业出版社,2007.

[73]Chung D. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J]. carbon, 2001, 39(2): 279—285.

[74]Dai Y, Sun M, Liu C, et al. Electromagnetic wave absorbing characteristics of carbon black cement - based composites[J]. Cement and Concrete Composites. 2010, 32(7): 508—513.

[75]欧进萍,高雪松,韩宝国.碳纤维水泥基材料吸波性能与隐身效能分析[J].硅酸盐学报.2006,34(8):901—907.

[76]高雪松,韩宝国,欧进萍.钢纤维水泥基材料吸波性能实验与隐身效能分析[J].功能材料,2006,37(10):1683—1688.

[77]熊国宣,陈阳如,李坚利,等.纳米TiO_2与水泥复合材料的吸波机理探讨[J].

功能材料，2007，38(5)：836—838.

[78] Han B G，Yu X，Ou J P. Self—Sensing Concrete in Smart Structures[M]. Amsterdam：Elsevier，2014：385.

[79] 罗子文. 无粘结 SMA 智能混凝土梁基本理论研究 [D]. 上海：同济大学，2006.

[80] Watanabe T，Fukayama S，Miyauchi M，et al. Photocatalytic activity and photo—induced wettability conversion of TiO_2 thin film prepared by sol—gel process on a soda—lime glass[J]. Journal of Sol－Gel Science and Technology，2000，19(1—3)：71—76.

[81] 朱国辉，晋传贵，段好伟. 纳米镍粉的制备及其电磁屏蔽效能的研究 [J]. 材料导报，2009(18)：22—24.

[82] 冯永成，瞿美臻，周固民，等. 碳纳米管在导电涂料中的应用研究——(Ⅰ) 碳纳米管对导电涂料导电性的影响 [J]. 高分子材料科学与工程，2004，20(2)：133—135.

[83] Stamatakis P，Palmer B R，Salzman G C，et al. Optimum particle size of titanium dioxide and zinc oxide for attenuation of ultraviolet radiation[J]. Journal of Coatings Technology，1990，62(789)：95—98.

[84] 姚武，左俊卿，吴科如. 碳纳米管－碳纤维／水泥基材料微观结构和热电性能 [J]. 功能材料，2013，44(13)：1924—1927，1931.

[85] Han B G，Yu X，Kwon E. A self－sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring[J]. Nanotechnology，2009，20(44)：445—501.

[86] 陈前林，吴建青，王龙现. TiO_2 光催化抗菌陶瓷的制备 [J]. 功能材料，2009，40(7)：1166—1168，1171.

[87] Shopsowitz K E，Qi H，Hamad W Y，et al. Free－standing mesoporous silica films with tunable chiral nematic structures[J]. Nature，2010，468(7322)：422—425.

[88] Han B G，Yu X，Ou J P. Nanotechnology in Civil Infrastructure：A Paradigm Shift. [M]. [S.L.]：Springer，2011：1—47.

致谢

本文得到国家自然科学基金项目 151578110 和 514288017 资助。

第 7 篇

新能源材料

能源和材料是支撑当今人类文明和保障社会发展的重要物质基础。长期以来化石能源在全球能源供应中占主导地位，但是，化石燃料匮乏、环境恶化、气候变化使得传统能源越来越难满足人类社会的发展要求。随着世界经济向低碳、可持续的方向转型，世界各国纷纷加大对新能源和可再生能源技术的投入，相应地，新能源材料的研发也迎来了难得的发展机遇。就我国而言，紧随国际发展趋势，大力支持新能源材料的研发和应用，对维护国家能源安全以及环境保护具有重要意义。

第 1 章　新能源材料概述

1.1　关于新能源材料的若干基本概念

新能源又称非常规能源，是指传统能源之外的各种能源形式，主要指清洁能源和可再生能源，通常情况下以绿色和低碳技术为标志。在某些情况下，新能源还指刚开始开发利用或正在积极研究、有待推广的能源。新能源和常规能源是相对而言的。20 世纪 50 年代初核裂变能开始用于生产电力和作为动力使用时，被认为是一种新能源。到 80 年代世界上不少国家已经把它列为常规能源。太阳能和风能虽然被利用的历史比较久远，但由于还需要通过系统研究和开发才能提高利用效率，扩大使用范围，所以还是将其列为新能源。目前各国对各类能源的称谓不尽相同，但共同的认识是，除常规化石能源和核能外，其他能源都可以称为新能源或可再生能源。主要包括太阳能、地热能、风能、水能、海洋能、生物质能以及由可再生能源衍生出来的生物燃料和氢能等。能源的分类如表 7-1-1 所示。

相对于传统能源，新能源普遍具有污染少、储量大的特点，并且许多新能源，如太阳能、风能等地理分布相对均匀。新能源和可再生能源技术的发展，一方面可以降低世界经济对传统化石能源的依赖，解决当今世界严重的能源枯竭问题；另一方面，可以促进世界经济向低碳和近零排放发展，减少人类对环境的污染和破坏；此外，还有助于减少由能源引发的武力和经济战争，促进世界和谐发展。

据有关方面预测，核能、太阳能即将成为未来的主要能源。

表 7-1-1　能源的分类

形成条件	利用历史	可再生资源	不可再生资源
一次能源	常规能源	水能、风能、地热、畜力、 生物能（薪柴秸秆、粪便等）、 新型核能、太阳能（自然干燥等）	化石能源（煤、石油、天然气） 核能
	新能源	生物质能（燃料作物制沼气、酒精等） 太阳能（收集器、太阳电池等） 水能（水电） 风能（风力机） 海洋能 地热	
二次能源	电力，煤炭，沼气，汽油、柴油、煤油、重油等油质品，蒸汽，热水，压缩空气，氢能等		

新材料是应用新技术、新工艺、新装备等，使传统材料性能有明显提高或产生新功能，或是设计开发出拥有传统材料所不具备的优异性能或特殊功能的材料。一般认为满足高技术产业发展需要的一些关键材料也属于新材料的范畴。一个产业的突破通常以该领域新材料技术的突破为前提，而新材料技术的突破往往会孕育一项新技术的诞生，甚至形成一轮新的产业革命。

新能源材料是实现新能源的转化和利用以及发展新能源技术中所要用到的关键材料，它是发展新能源技术的核心和应用基础。从材料学的本质和能源发展的观点看，能储存和有效利用现有传统能源的新型材料也可以归属为新能源材料。

1.2　新能源材料的特点及分类

1.2.1　新能源材料的特点

据其功能而言，新能源材料具有 3 个特点。

特点 1：某些新能源材料能够把原来习用已久的能源变成新能源。例如，从古代起人类就使用太阳能取暖、烘干等，现在利用半导体材料把太阳能有效地直接转变为电能。再有，过去人类利用氢气燃烧来获得高温，现在依靠燃料电池中的触媒、电解质，使氢与氧反应而直接产生电能。

特点 2：某些新能源材料可提高储能和能量转化效率。例如，储氢合金可以改善氢的存储条件，并使化学能转化为电能。金属氢化物镍电池、锂离子电池等都是靠电极材料的储能效果和能量转化功能而发展起来的新型二次电池。

特点 3：某些新能源材料可以将新型能源转换成以电能、热能为主的能源形式。以太阳能光伏和光热材料为代表，它们在工作过程中不释放包括 CO_2 在内的有害气体，对建设低碳、绿色环保的地球生态环境意义重大。

1.2.2 新能源材料的分类

新能源材料种类繁多，根据其在不同新能源开发中的应用，主要分为：太阳电池材料，以镍氢电池材料、锂离子电池材料为代表的绿色电池材料，燃料电池材料，风电叶片材料，发展生物质能所需的重点材料，可燃冰，新型相变材料，节能材料（如 LED 发光材料）以及铀、氘、氚为代表的反应堆核能材料等。目前，太阳电池材料领域研究的热点和前沿技术包括：晶体硅太阳电池材料、非晶硅薄膜电池材料、化合物薄膜电池材料和染料敏化电池材料。绿色电池材料领域的研究热点和前沿技术包括：高能储氢材料、聚合物电池材料和磷酸铁锂正极材料。燃料电池材料领域的研究热点和前沿技术包括中温固体氧化物燃料电池和电解质材料。本节将针对国内外研究热点，重点介绍几种在新能源发展过程中发挥重要作用且前景较好的新能源材料。

1. 太阳电池材料

太阳电池材料主要指用于制作太阳电池的各类半导体材料，主要包括用于制备硅基太阳电池的硅材料，用于制备 GaAs 太阳电池的各类 III-V 族化合物材料，用于制备铜铟硒太阳电池的 II-VI 族化合物材料，用于制备有机太阳电池的功能高分子材料以及用于制备纳米晶化学太阳电池（简称 NPC 电池）的各种材料等。其普遍的要求是：半导体材料的禁带不能太宽，要有较高的光电转换效率，材料本身对环境不造成污染，材料便于工业化生产且材料性能稳定。

硅基太阳电池中涉及的材料又包括单晶硅、多晶硅、非晶硅、微晶硅、纳米硅、非晶锗硅等。其中，单晶硅太阳电池转换效率最高，技术也最为成熟。在单晶硅太阳电池的制备中，涉及材料的加工工艺主要有表面织构化、发射区钝化和分区掺杂。其他硅材料主要用于制备薄膜太阳电池，最关键的材料加工技术是高质量薄膜材料的制备。Ⅲ－Ⅴ族化合物太阳电池材料主要有 GaAs、GaInP 等。许多Ⅱ－Ⅵ族化合物半导体材料都可用于太阳电池的光吸收层，主要材料有 CdTe、$CuInSe_2$（CIS）、$CuInGaSe_2$（CIGS）等。

有机太阳电池是一个比较新的研究方向，原理是利用不同氧化还原型聚合物的不同氧化还原电势，在导电材料（电极）表面进行多层复合，制成类似无机 P-N 结的单向导电装置。涉及的聚合物高分子材料具备柔性好、制作容易、材料来源

广泛、成本低等显著优势，但有机高分子存在时间和光照稳定性问题尚未解决，亟须进一步研究探索。

NPC 电池的典型代表是染料敏化太阳电池，它由一种窄禁带半导体材料修饰、组装到另一种宽带隙半导体材料上形成。涉及的窄禁带半导体材料主要采用过渡金属 Ru 以及 Cs 等的有机化合物敏化染料，宽带隙半导体材料一般为纳米多晶 TiO_2。此外，NPC 电池中还包括一类很重要的材料，即用于导电离子传导的氧化－还原电解质。NPC 电池的发展主要依赖新型窄禁带半导体材料的开发和高效电解质的开发。

当今，硅仍然是最理想的太阳电池材料。但随着新材料的不断开发和相关技术的发展，以其他材料为基础的太阳电池也愈来愈显示出诱人的前景。

2. 锂离子电池材料

锂离子电池因高比容量而引起重视。2000 年，锂离子电池在小型二次电池中已占首位。其涉及的主要材料如下：

（1）负极材料　锂负极材料：早在 1965 年，人们就曾使用金属锂作为锂离子电池的负极材料并曾投入批量生产。但由于金属锂在充放电过程中形成树枝状沉积，用户在使用安装此种电池的对讲机时被烧伤，该种电池被迫停产和收回。

纳米合金负极材料：为了克服金属锂负极的安全性缺陷，人们曾研究了许多种合金体系。虽然一些锂合金可以避免枝晶生长，但经过多次充放电，体积的变化致使负极粉化，造成电池性能变差。最近发现，纳米级的 Sn 及 SnSb、SnAg 等金属间化合物可使电池的循环性能明显改善，有望在将来用于电池生产。

碳负极材料：现在实用化的电池都是采用碳负极材料，靠锂离子的嵌入或脱嵌而实现充放电，从而避免了上述不安全问题。目前，使用的碳材料有硬碳、天然石墨或中间相微珠等。通过研究不同碳素材料在电池中的行为进而优化碳负极材料，是锂离子电池研究中的一大热点。

（2）正极材料　目前普遍使用的正极材料为 $LiCoO_2$。人们已对此种化合物的晶体结构、化学组成、粉末粒度及粒度分布等因素对电池性能的影响进行了深入研究，并在此基础上获得理想的电池性能。

为了降低成本和进一步提高电池的性能，人们还提出了用其他金属取代金属钴的方案。研究较多的是 $LiMn_2O_4$，目前正针对其高温下性能差的缺点进行改进。现在研究的还有双离子传递型聚合物正极材料。

（3）电解质材料　电解质材料也是锂离子电池重要的组成部分，目前主要集中在研制非水溶剂电解质以获得高电压。重点是针对稳定的正负极材料调整电解质溶液的组成，以优化电池的综合性能。此外，为了提高电池碳负极的初始充放电效率，人们还在电解液中添加 SO_2 和 CO_2 等。为了提高锂离子电池的低温性能，人们研发了各种三元或多元混合溶剂的电解质。聚合物电解质的开发具有长远意义，关系到新型电池的发展，是锂离子电池的重要研究方向之一。

3. 金属氢化物镍（MH-Ni）电池材料

负极材料：MH-Ni 电池的负极材料储氢合金，具有独特的储氢和电化学反应双重功能。储氢合金一般需要具备以下主要特征：①合金的储氢容量较高，平台压力适中，对氢的阳极氧化具有良好的电催化性能；②在氢的阳极氧化电位范围内，合金具有较强的抗氧化性能；③在反复充放电循环过程中，合金的抗粉化性能优良；④在强碱性电解质溶液中，合金组分的化学性质稳定；⑤合金具有良好的电和热的传导性；⑥合金的成本低廉。

正极材料：MH-Ni 电池的正极材料通常为球形 $Ni(OH)_2$，其决定了电池的容量，进一步改进正极材料的性质对于提高电池的综合性能有重要意义。正极材料的研究与开发着重于：通过材料制备技术的研究，进一步控制 $Ni(OH)_2$ 的形状、化学组成、粒径分布、结构缺陷及表面活性等，从而进一步提高正极的放电容量及循环稳定性等性能。

4. 燃料电池材料

研究开发燃料电池的目的是使其成为汽车、航天器、潜艇的动力源或组成区域供电，针对上述不同用途开发的燃料电池有碱性燃料电池 (AFC)、磷酸型燃料电池 (PAFC)、质子交换膜型燃料电池 (PEMFC)、熔融碳酸盐型燃料电池 (MCFC) 和固体氧化物燃料电池 (SOFC) 等。在所有类型的燃料电池中，最关键的材料是电解质材料。电池类型不同，用到的电解质也差别甚远。碱性氢氧电池的电解质材料为氢氧化钾，磷酸型燃料电池的电解质材料为磷酸盐基质，熔融碳酸盐型燃料电池的电解质材料为碳酸锂、碳酸钠、碳酸基质，固体氧化物燃料电池的电解质材料为稳定氧化锆（形状为薄膜或薄板）等，质子交换膜型燃料电池的电解质材料为聚合物膜。

5. 其他新能源材料

其他新能源材料指生物质能、风能、地热能等新能源技术所用的关键材料。生物质能一般利用生物体本身来产生能量，具体指将植物转化为乙醇、氢气、生

物柴油以及其他生物化学材料，比如木糖醇、甘油、异丙醇等。

风能材料主要包括风电齿轮箱材料、塔筒和机舱罩材料、风电叶片材料。我国风能资源比较丰富，但与世界先进国家相比，风能利用技术和发展差距较大，其中最主要的问题是尚不能制造大功率风电机组的叶片复合材料。

节能储能材料的技术发展也使得相关的关键材料研究迅速发展。利用相变材料的相变潜热实现能量的储存和利用，提高能效和开发可再生能源，是近年来能源科学和材料科学领域十分活跃的前沿研究方向。

电容器材料、热电转换材料一直是传统能源材料的研究范围，随着新材料技术的发展和新能源含义的拓展，一些新的热电转换材料也可以当作新能源材料来研究。

1.3 新能源材料的发展历程

太阳能、生物质能、核能（新型反应堆）、风能、地热、海洋能等一次能源和二次能源中的氢能等被认为是新能源。新能源的发展一方面依靠利用新的原理（如聚变核反应、光伏效应等）发展新的能源系统，同时还必须依靠新材料的开发与应用，才能使新的能源系统得以实现，并进一步地提高效率、降低成本。能源布局的调整和新能源地位的强化，都对新能源材料提出了新的需求。

1.3.1 太阳电池材料发展

制造太阳电池的半导体材料已知有十几种，从能量转换效率、成本、器件使用寿命和应用领域等方面综合评价，硅材料具备明显优势。因此，硅基太阳电池在过去和现在一直处于主导地位，占据着太阳电池市场的绝大多数份额。

1883 年，美国科学家 Charles Fritts 在半导体硒材料上涂一层薄薄的金制造出人类第一个太阳电池。虽然其转换效率仅有 1%，无法应用于实践，但这标志着人类采用高级方式利用太阳能资源的开始。1954 年，美国贝尔实验室制造出第一个单晶硅太阳电池，转换效率为 4.5%，之后很快便达到 10%，这是人类在光伏电池发展史上里程碑式的突破。1955 年和 1956 年，人们先后制造出 CdS 太阳电池和 GaAs 太阳电池。至此，传统的三类太阳电池——硅太阳电池、II-VI 族和 III-V 族太阳电池陆续登上了光伏行业的舞台。太阳电池的最初应用主要面向人造卫星，从 1958 年发射的“先锋 1 号”卫星开始到 20 世纪 70 年代，高效的单晶硅太阳电池一直是空间电池的首选。此后，GaAs 太阳电池展现出越来越高的能量转换效率和更好的稳定性，逐渐占据空间应用的主流。目前，多结 GaAs 太

阳电池的 AM1.5 实验室效率已接近 40%。从 80 年代初苏联、日本、美国的航天飞行器空间主电源开始应用 GaAs 太阳电池至今，GaAs 组件在空间电源领域应用比例已超过 90%。因此自 1994 年后，硅太阳电池逐渐转向民用领域。

硅太阳电池主要存在单晶硅太阳电池和薄膜硅太阳电池两大类。其中，单晶硅太阳电池在早期占据绝对的优势，也是开发最快的太阳电池，其主要目标是获得高能量转换效率。目前，商业化单晶硅太阳电池的转换效率已达到 19.5%，发电成本大幅降低。薄膜硅太阳电池又包含非晶硅、多晶硅、微晶硅、非晶锗硅太阳电池等多种类型。薄膜太阳电池的发展开始于 20 世纪 70 年代，主要以降低光伏发电的成本为目标。近年来，随着薄膜制备技术的成熟，薄膜硅太阳电池凭借用料节省、弱光性好、可以批量制备、柔软性好且易于建筑一体化等优势引起了越来越高的重视。当前，薄膜硅太阳电池的最高商业化效率也已经达到 16.3%，其市场份额基本和晶硅太阳电池持平。

GaAs 高效聚光电池是低成本建造太阳能电站的有效途径。当前三结 GaAs 聚光太阳电池的效率已经达到 40.07%。因此，从 2007 年 8 月，GaAs 太阳电池在民用领域也开始得到应用。Ⅱ－Ⅵ族太阳电池用到的主要材料包括硫化镉 (CdS) 和碲化镉 (CdTe) 化合物半导体，以及拓展的铜铟硒 (CuInSe) 和铜铟镓硒 (CuInGaSe) 化合物半导体。目前人们已经成功制备了转化效率达到 17% 的 CdS/$CuInSe_2$ 结构的太阳电池和转换效率为 16.5%CdS/CdTe 太阳电池。

无机太阳电池存在成本高、能耗大、加工难等问题，一定程度上限制了其大规模应用。近十年来，有机半导体材料作为一类极具前景的光伏材料，引起了研究人员的高度重视。一方面，有机半导体材料成本较低，结构和功能易于调控；另一方面，它们可以被溶液加工和大面积成膜，为大规模利用太阳能获得廉价电能提供了有利条件。此外，有机半导体材料良好的柔韧性也拓宽了其应用范围，如在柔性可卷曲体系中实现光伏供电等。代表性的光伏活性有机材料主要有：酞菁、芘、富勒烯等小分子和 PPV 类、PTh 类、聚芴类等聚合物材料。

1991 年，瑞士洛桑联邦理工学院的 Gratzel 教授研制出用羧酸联吡啶钌 (Ⅱ) 染料敏化的 TiO_2 纳米晶多孔膜作为光电阳极的化学太阳电池，称为染料敏化纳米晶太阳电池 (DSSC)。其光电转换效率在 AM1.5 模拟日光照射下可达 7.1% ～ 7.9%，成本仅为硅电池的 1/10 ～ 1/5，使用寿命可达 15 年以上。该类电池与传统的晶体硅太阳电池相比，具有结构简单、成本低廉、易于制造的优点，光稳定性好，对光强度和温度变化不敏感，对环境无污染，自问世以来得到广泛

关注。染料敏化太阳电池主要由宽带隙的多孔 n 型半导体 (如 TiO_2、ZnO 等)、敏化层 (有机染料敏化剂) 及电解质或 P 型半导体组成。

1.3.2 锂离子电池材料发展

锂离子电池最主要的构成材料是正极材料、负极材料、电解液与隔膜。正极材料为锂盐，其作用是提供自由的锂离子。负极材料的作用是储存锂离子。电解液主要由锂盐和溶剂组成，负责锂离子和电子的传输。隔膜的主要作用为隔离正、负极并使电池内的电子不能自由穿过，让电解液中的离子在正负极间自由通过，同时防止正负极短路，保护电池的安全。

锂一次电池的研究始于 20 世纪 50 年代，70 年代，锂一次电池才实现商品化。已实用化的锂一次电池有 Li-MnO_2、Li-I_2、Li-CuO、Li-$SOCl_2$、Li-$(CF_x)n$、Li-SO_2、Li-Ag_2CrO_4 等。20 世纪六七十年代，几乎在研究锂一次电池的同时，研究发现许多插层化合物可以和金属锂发生可逆反应，构成锂二次电池。最初的锂二次电池由 Steele 于 20 世纪 70 年代初提出，其设计的电池是以层状 TiS_2 为正极、金属锂为负极的 Li-TiS_2 体系，1976 年 Whittingham 证实了这一体系的可靠性。随后，Whittingham 所在的 Exxon 公司对 Li-TiS_2 体系展开了大量的研究，希望将其商品化。但是该体系很快暴露出诸多不足：活泼金属锂易使有机电解液发生分解，引起电池内压升高，而且由于锂电极表面的不平导致其表面电位分布不均，充电过程中锂易从电解液中析出形成锂枝晶，一方面会造成锂的可逆容量损失，另一方面，枝晶穿透隔膜将正负极连接起来而产生短路，瞬间产生大量的热量，带来严重的安全隐患。这一系列因素使得金属锂二次电池产生了循环性能差和安全性等问题，因此 Li-TiS_2 体系的商品化未能完成。

为了克服锂电池的这种不足，提高电池的安全性能，人们采取了多种办法，针对电解液和负电极主要分为两种：一种办法是将有机电解液改换为固态聚合物电解液，也就是锂聚合物电池，但是这种电池只能在高于 80℃的条件下有效地工作；另一种办法是将负极金属锂换成锂合金或化合物，使锂以离子状态存在于电池中，避免锂枝晶的产生。尽管锂合金负极的使用解决了金属锂负极的安全隐患，但是锂合金在循环过程中却会发生较大的体积变化，导致电极材料粉化，容量迅速衰减。

1980 年，Armand 首次提出了“摇椅电池”的构想，即用低嵌锂电势的插锂化合物代替金属锂作为负极，高嵌锂电势的插锂化合物做正极。同年，美国德州大学的 Goodenough 等提出以钴酸锂作为锂二次电池的正极材料，1985 年发现碳

材料可以作为锂二次电池的负极材料。

1987 年，日本 Sony 公司选用嵌锂焦炭（Li_XC_6）作为负极取代金属锂，得到结构为 $Li_XC_6/LiClO_4$+PC+EC/$Li_{1-x}MO_2$(M=Co，Ni，Mn) 的电池体系，以能够可逆嵌脱锂的碳材料作负极，在保持了较高电压和比能量的同时，成功弥补了锂二次电池循环寿命低、安全性能差的缺陷。

1990 年日本 Nagoura 等人研制成以石油焦为负极、以钴酸锂为正极的锂离子二次电池，同年日本 Sony 和加拿大 Moli 两大公司宣称将推出以碳为负极的锂离子电池。1991 年，日本 Sony 能源技术公司与电池部联合开发了以聚糖醇热解碳 (PFA) 为负极的锂离子电池，实现了锂离子电池的商品化。1993 年，美国 Bell-core 公司首先报道了聚合物锂离子电池。此后，关于锂离子电池材料的研究不断深入和系统化。1997 年，Sony 公司又将石墨做负极的锂离子电池商品化。

目前的锂离子电池已经十分稳定，已普遍应用于摄像机、移动电话、笔记本电脑和电动工具等便携式电源。相应地，对锂离子电池材料也形成了较为统一的认识。

正极材料：锂离子电池正极材料一直是限制锂离子电池发展的关键。和负极材料相比，正极材料能量密度和功率密度低，也是引发锂离子电池安全隐患的主要原因。传统使用的正极材料是钴酸锂，其制作工艺简单，循环稳定性好，是商用的主流正极材料，目前主要用于手机锂电池等。但由于钴酸锂价格昂贵、有环境污染、比容量较低、稳定性不够，无法满足车用动力电池技术要求。而锰酸锂、磷酸锂热稳定性好、资源丰富、价格低廉且无污染，是理想的动力电池正极材料。除了这些已经产业化的材料外，正处于研发阶段的正极材料主要包括一些含 Si、V 的正极材料及有机物正极材料等。例如，正硅酸盐 Li_2MSiO_4 在形式上可以允许两个锂离子的交换，理论放电比容量较大，电子电导率也较高，是当前研究的热点。$Li_{1+x}V_3O_8$ 为单斜晶系，具有层状结构，嵌锂离子性能优良、容量大、循环寿命长，1mol $Li_{1+x}V_3O_8$ 中能嵌入 3mol 锂离子，放电比容量为 279mA·h/g，也是备受关注的正极材料。导电聚合物也可以用作锂离子电池正极材料，目前在研的材料有：聚吲哚、聚苯胺 (PAn)、聚吡咯 (PPY)、聚乙炔 (PA) 和聚对亚苯基 (PPP) 等。此外，锂过渡金属氟磷酸盐 $LiMPO_4F$(M=Fe，V，Ti，Co) 具有安全性高、成本低、多维的锂离子迁移通道及优异的电化学性能等优点，吸引了众多研究人员的注意，但目前还处于研究探索阶段。

负极材料：目前主流的锂离子二次电池负极材料是碳石墨材料。较具实用价

值和应用前景的碳主要有三种：高度石墨化的碳、软碳和硬碳、碳纳米材料。在新材料的探索方面，对锂化过渡金属氮化物及过渡金属磷族化合物的进一步研究有可能为锂离子蓄电池负极材料的发展注入新的活力。

电解液：主要由锂盐和溶剂组成，其中最关键的是锂盐。电解液在锂离子电池的正、负极之间起着输送 Li^+ 的作用，电解液与电极的相容性直接影响电池的性能，电解液的研究开发对锂离子二次电池的性能和发展非常重要。目前最适宜的是六氟磷酸锂和有机溶剂电解液。从根本上解决锂离子电池安全性问题的应为离子液体电解液。

隔膜：是液态锂离子二次电池的重要组成部分。隔膜本身是电子的非良导体，但也允许电解质离子通过。此外，隔膜材料还必须具备良好的化学、电化学稳定性和机械性能以及在反复充放电过程中对电解液保持高度浸润性。隔膜材料与电极之间的界面相容性，隔膜对电解质的保持性均对锂离子电池的充放电性能和循环性能等有较大影响。锂离子电池隔膜的材料主要有聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）单层微孔膜，以及由 PP 和 PE 复合的多层微孔膜。

1.3.3 金属氢化物镍电池材料发展

金属氢化物镍电池中最关键的材料为储氢材料。1970 年，Van Vucht 首先发现 $LaNi_5$ 合金具有良好的可逆储氢性能，可以用于氢的高效储运。1984 年，$LaNi_5$ 合金用于镍氢电池负极时容量明显衰减的问题得以解决，MH-Ni 电池开始步入实用化阶段。随着人们环境保护意识的提高，以及当前计算机、便携式通信系统和家用电器等的小型化、轻量化发展，对 MH-Ni 电池存在大量的市场需求。

1990 年日本实现了 MH-Ni 电池的产业化生产。90 年代后，各发达国家的著名电池生产厂商如美国的 Ovonic 公司，日本的松下、三洋等大公司纷纷加快了 MH-Ni 电池产业化的步伐，日本发展尤为迅速。2000 年日本小型 MH-Ni 电池总产量已达到 9 亿只（使用 ABS 型贮氢合金约 6 000t）。我国在贮氢合金材料及 MH-Ni 电池的研究与开发领域起步较日本并不落后。1990 年我国已成功研制出 AA 型 MH-Ni 电池，1992 年在中山市建立了 MH-Ni 电池生产基地，而后在中山、天津、沈阳及杭州等地建立了贮氢电极合金和 MH-Ni 电池生产基地。2003 年，我国年产小型 MH-Ni 电池 5 亿只，贮氢合金产量达到 6 000t/a。随着电动汽车的发展，为满足混合动力电池的需求，丰田与松下共同出资 2.91 亿美元，新建了一家生产主流镍氢电池的工厂，丰田镍氢电池产能从 2007 年的 50 万块增加到 2014 年的 100 万块。

$Ni(OH)_2$ 正是 MH-Ni 电池的正极材料活性物质，其优劣直接影响电池性能的好坏。$Ni(OH)_2$ 是一种导电性不良的 P 型半导体，为了改善其性能需要添加导电剂或添加剂 ,Co 是镍氢电池的常用导电剂。随着纳米加工技术的发展，90 年代以来，纳米材料在化学电源中的应用也日益受到重视。纳米 $Ni(OH)_2$ 与普通 $Ni(OH)_2$ 相比具有更优异的电催化活性以及高放电平台、高电化学容量、高能量密度。另外，掺杂碳纳米管、纳米 ZnO 等也都可以使镍氢电池表现出更好的循环寿命和放电容量。

MH-Ni 电池的负极为储氢合金充当活性物质的氢化物电极。负极材料应该具备以下条件：室温下能可逆吸放大量的氢，具有高容量、长寿命、良好的电催化活性和高倍率充放电性能，以及在氢的阳极氧化电位范围内具有抗氧化性能等。目前，贮氢合金负极材料体系主要有 AB_5 型、AB_2 型、AB 型、A_2B 型、BCC 固溶体型合金及其他新型合金等。

1.3.4 燃料电池材料发展

碱性燃料电池 (AFC) 是最早得到实际应用的一种燃料电池。早在 1902 年和 1904 年，里德 (J．H．Reid) 和洛埃尔 (P．G．L．Noel) 各自提出用 KOH 做电解质的燃料电池，开创了碱性燃料电池的门类。20 世纪 60 年代，美国航空航天局将碱性燃料电池用在阿波罗宇宙飞船上提供电力和饮用水。

碱性燃料电池采用 35% ～ 50% 的 KOH 作为电解液，浸在多孔石棉膜中或装载在双孔电极碱腔中，两侧分别压上多孔的阴极和阳极构成电池。碱性燃料电池的阳极采用多孔镍作为电极材料和催化剂，阴极可用银作为催化剂。碱性燃料电池存在一个非常明显的缺点：碱性电解液非常容易和 CO_2 发生化学反应生成碳酸盐，从而堵塞电极的孔隙和电解质的通道，使电池的寿命受到影响。所以要求对电池的燃料和氧化剂进行净化处理，将 CO_2 含量降低到毫克 / 米 ^{3} 数量级。这使得电池不能直接采用空气作为氧化剂，也不能使用重整气体作为燃料，极大地限制了碱性燃料电池在地面上的应用，如用做电动汽车的电源。

20 世纪 70 年代，人们开始研究与 CO_2 不发生作用的酸性电解质，稳定性好、酸性较弱、氧化性较弱的磷酸被选中。磷酸电池制作成本低，是目前发展最为成熟的燃料电池，已经实现商品化。目前，国际上大功率的实用燃料电池电站均是这种燃料电池。美国联合技术公司 UTC(前身为国际燃料电池公司 IFC) 开发的 200kW PC25 磷酸燃料电池电厂是第一个商业燃料电池电厂，在北美洲、南美洲、欧洲、亚洲和澳大利亚已经安装 260 个，单座电厂运行时间已经超过 57 000h。

日本的 FCG-1 计划先后开发了 4.5MW 和 11MW 磷酸燃料电池电站，后者是目前世界最大的燃料电池电站，电效率为 41.1%，热电总效率为 72.7%。但是，燃料电池电站的运行发电成本比网电价格高很多，目前为 1 500 ～ 2 000 美元 / 千瓦，还很难取得商业运行优势。

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 采用质子交换膜作为电解质，避免了液态电解质的操作复杂性，又可以使电解质做得很薄，从而提高电池的能量密度。目前普遍采用的膜为全氟磺酸膜，氟碳主链上带有磺酸基团取代的支链。PEMFC 具有高功率密度、高能量转换效率、低温起动、环境友好等优点，最有希望成为电动汽车的动力源。戴姆勒一克莱斯勒公司与加拿大的巴拉德 (Ballard) 公司合作，开发的质子交换膜燃料电池汽车已到第 6 代，采用 35MPa 高压储氢，行程可达 150km，最高时速 140km。日本丰田已经开发出第 5 代燃料电池混合动力车 FCHV-5，采用车载重整制氢。福特、本田、宝马等各大汽车制造商也都在积极推动燃料电池电动汽车或混合动力车的发展。限制燃料电池汽车大规模发展的主要因素包括燃料电池系统价格昂贵、缺乏供氢系统等，短期内还很难实现商业化。

固体氧化物燃料电池 (SOFC) 也是一种全固体燃料电池。其工作原理是：氧气在阴极被还原成氧离子，在电解质中通过氧离子空穴导电从阴极传导到阳极，氢气在阳极被氧化，结合氧离子生成水。目前广泛使用的高温 SOFC 电解质材料为 Y_2O_3 稳定化的 ZrO_2（简写为 YSZ）。ZrO_2 本身不具有离子导电性，掺杂约为 10% 的 Y_2O_3 后，晶格中的部分 Zr^{4+} 被 Y^{3+} 取代，形成 O^{2-} 空穴。每加入两个 Y^{3+} 便形成一个 O^{2-} 空穴。SOFC 的阳极为多孔 Ni-YSZ，阴极材料广泛采用的是掺锶的锰酸镧。德国西门子 - 西屋电器公司正在试运行 100 ～ 250kW SOFC 管状工作堆，日本三菱重工等公司也在积极开发 SOFC 电堆技术。

氢燃料电池是使用氢这种化学元素，制造成储存能量的电池，其基本原理是电解水的逆反应。严格地说，氢燃料电池是一种发电装置，是把化学能直接转化为电能的电化学发电装置。另外，氢燃料电池的一项关键技术 —— 由特制多孔性材料制成电极，不仅为气体和电解质提供较大的接触面，还对电池的化学反应起到催化作用，具有无污染、无噪声、高效率等优点。作为真正意义上“零排放”的清洁能源，氢燃料电池在发达国家的应用正在提速。2013 年，韩国汽车制造商现代汽车、德国汽车制造商奔驰、日本车企日产汽车和丰田汽车与美国能源部达成协议，准备推出首轮氢动力汽车。该项目名为 H_2USA，将把关注的重点放在氢能源基础设施的构建上。英国政府提出，将大力发展氢燃料电池汽车，计划

2030 年之前英国氢燃料电池车保有量达到 160 万辆，并在 2050 年之前使其市场占有率达到 30% ～ 50%。2008 年奥运会期间我国自主研制的 20 辆氢燃料电池轿车投入运营，为首批获得国家上路许可证的燃料电池汽车。

1.3.5 储热材料的发展

能源的供应与需求存在较强的时间性，很多情况下还不能合理地利用，导致能源的大量浪费。这时需要一些材料将这些热量或冷量储存起来，在需要时再将其释放出来，这样的材料就叫做热能储存材料。对热能储存材料的认识及研究仅是近几十年的事情，但由于其应用十分广泛，已成为一种日益受到重视的新材料。

热能储存的方式主要有显热、潜热和化学反应热 3 种。显热储存时，储能材料在储存和释放热能时，仅材料温度发生变化，而不发生其他变化，储能方式简单、成本低。潜热储存则是利用储热材料在发生相变时吸收或放出热量来储能与释能，也称为相变储能。相变可以是固－液、液－气、气－固和固－固等，但以液－固相变最为常见。化学反应热储存则是利用储能材料相接触时发生可逆的化学反应来储、放热能。如，化学反应的正反应吸热，热能便被储存起来；逆反应放热，则热能被释放出去。

热能材料一般应满足以下要求：热能储能量大；稳定性好；无毒、无腐蚀，不易燃易爆；材料的热导率大；储放热时材料的体积变化小或无变化。相变储热材料要求具有大的相变热，潜热储热则需要其反应热效应大，而显热材料则是要求材料的热容大。在实际应用中通常同时采用两种或多种储热材料，其目的就是调整储热材料的性能从而满足实际需要。

储热材料的种类很多，按材料的组成可以分为无机和有机两大类，按储热方式可以分为显热、潜热和反应储热三种，按储热温度范围可以分为高温、中温和低温三种类型。

显热存储介质普遍存在易得、化学性质稳定，但温度波动大的性质。根据显热存储介质的形态可分为液体显热存储介质和固体显热存储介质。液体显热存储介质有乙醇、丙醇、丁醇异、丁醇辛烷和水。当储热温度较高时高压容器的费用很高，水则不适合做为存储介质。固体显热存储介质主要有岩石土壤金属类以及无机氧化物类。固体显热存储介质不和其他物质发生反应，不易腐蚀、便宜易得，主要有岩石床储热器和地下土壤储热器。

潜热存储按化学组成分为有机物类和无机物类。无机物类储热密度大、腐蚀性小、成本低，是目前固－液存储主要的研究方向，广泛用于废热、余热回收和

太阳能相变储能。无机物类分为水合盐类、熔盐类。水合盐类主要应用于中低温相变存储，融化热大、热导率高、体积变化小，但因易出现过冷和分层现象需加入防过冷剂和防相变分离剂。常用的无机水和盐相变材料主要有硫酸钠水合盐、三水醋酸钠等。常见的熔盐是硝酸盐、碳酸盐、氯化物和氟化物，其缺点是热导率低和腐蚀严重。有机相变材料在固态时易成形、腐蚀性小、化学性质稳定、便宜易得、不易过冷和分层，主要分为石蜡、酯酸类、多元醇类。石蜡的分子式为 C_nH_{2n+2}，由直链烷烃混合而成，其熔点和溶解热随着碳链的增加而增大，n=12~36 时的熔点为 -12~759℃。石蜡的热导率仅为 0.15W/（m·℃），溶解时体积增大 11%~15%。酯酸类的分子式为 $C_nH_{2n+2}O_2$，其性能类似于石蜡类。多元醇适用于固－固相变蓄热，价格偏高、热导率低，主要的相变材料有季戊四醇（PE）新戊二醇（NPG）。单一的多元醇相变温度较高，不适用于低温相变。为了增大相变温度的范围可将两种及以上的多元醇按不同比例混合。常见的有 PE、PE-TMP（三羟甲基烷）、PE-NPG。

化学反应热存储密度高、易于长途运输，但价格高、系统复杂，需要专业人员操作。化学反应热存储要求反应可逆性好、反应快，反应物和生成物易存储、无毒、无腐蚀性。目前还没有完全符合这些条件的物质，该类存储还处于研究阶段。

第 2 章　世界新能源材料发展评述

2.1　新能源材料科技与产业发展趋势

近几十年，欧洲的发达国家以及美、日等发达国家均将材料科学技术列为重中之重的优先发展领域，特别是新能源材料科技已成为各国低碳经济发展热潮中的重点突破方向与技术制高点。新能源材料包括新能源技术材料、能量转换与储能材料和节能材料，分别在构建新能源高效智能的发、输、配、储、用各环节肩负着技术变革与装备支撑的作用。

2012 年，全球经济复苏进程放缓。为刺激实体经济发展，主要发达国家都加大了对功能材料、特别是新能源材料研发的支持力度。在这样的背景下，由新能源材料的发展而带动的新技术和新产品市场不断扩大。BCC 的技术市场研究报告称，2009 年全球可再生能源市场中新能源材料及器件市值为 116 亿美元，2009—2014 年的复合年增长率 (CAGR) 为 7.8%。其中，太阳能应用 (包括光伏和

热利用）相关的材料将占据最大的市场份额，第二大市场占有者为风能利用相关材料。从市值增速来看，未来几年需求增长最快速的领域将在小水电和海洋能源利用相关材料领域，第二增速将产生在地热能源利用相关的材料领域。

当前，随着技术的进步和产业的发展，我国光伏产业规模及产量、国内年新增装机世界第一；风力发电产业规模及产量、年新增及累计装机容量位居全球首位，已成为我国第三大电源；太阳能热水器保有量和安装量世界第一。风能、太阳能等可再生技术在有些国家和地区已经实现平价上网，预计 2020—2030 年实现和常规能源完全竞争。我国在应对全球气候变化和环境问题方面提出了 2020 年非化石能源占一次能源消费比重达到 15%，2030 年达到 20% 的战略目标；美国、德国、丹麦等国家分别提出了到 2050 年可再生能源占电力消费 80% ～ 100% 的发展目标。国际能源署（IEA）发布的《2015 年世界能源展望》报告指出，可再生能源已经在电力领域占据了重要位置，未来还将进一步增加。IEA 统计显示，2014 年，可再生能源已经成为仅次于煤炭的全球第二大电力来源。另有环保组织表示，全球可再生能源技术发展突破远比想象中快，可再生能源的全部潜力尚未完全发挥出来。按其估计，在各国政府的支持下，全世界很有可能在 2050 年实现电力 100% 来自可再生能源。

随着学科交叉的日益紧密，世界新能源材料科技与产业的发展将会呈现以下新的趋势。

（1）新能源材料技术与其他技术深度结合　新能源材料技术与生物技术、信息技术等结合，已经深入融合到其他高技术领域与产业中，形成跨学科、跨领域的发展趋势。新能源材料产业带动了能源、生物、环保、交通等多个产业的发展，反过来也促进了新能源材料产业的发展。

（2）新能源材料技术发展趋向“四化”　随着全球经济一体化进程加速，经济、科技竞争不断加剧，新能源材料发展也由军事需求向民用需求转变，新能源材料技术的发展更加趋向于结构功能一体化、功能材料智能化、材料与器件集成化、制备及应用过程绿色化。

（3）新能源材料产业链协同发展　新能源材料具有跨学科、跨领域的特征，与能源、生物、医疗、环保、交通、建筑等领域关系紧密，产业也出现了横向扩散和相互包容的趋势。国外诸多先进企业都十分重视行业的系统布局，并形成了垄断企业，目前最主要的新能源材料生产技术仍被杜邦、巴斯夫、拜耳、埃克森美孚、通用电气、Ticona、陶氏化学、日本帝人、韩国 LG 等大型跨国公司长期垄断。

新能源材料与器件制造一体化，上下游产业纵向联合，产业链向下游延伸。

（4）新能源材料产业更加注重可持续发展，强调高效、绿色、低能耗、低污染甚至无污染　未来的新能源材料产业的发展将注重加强与资源、能源、环境的协调发展，注重资源的再生利用，注重发展的低能耗、无污染或少污染，提高产品的人性化和环境友好化。

此外，伴随新能源材料制备技术水平的不断提高，材料的高性能、低成本趋势明显，进一步提高产品性能、降低产品成本将成为新能源材料发展方向之一。

2.2　新能源材料发展潜力

2.2.1　新能源材料资源可开发利用状况

太阳电池材料资源：太阳电池是把光能直接转化成电能的装置。民用太阳电池占据绝大多数市场份额，需求量最大。目前民用电池仍以硅基太阳电池为主（包括单晶硅电池和薄膜硅电池），因此硅元素的地球储量决定了硅基太阳电池的发展潜力。在地壳中，硅元素是第二丰富的元素，构成地壳总质量的 26.4%，仅次于第一位的氧（49.4%）。并且，硅元素的存在形态多为硅石，非常容易提纯和制备成多晶硅。因此，太阳电池材料资源丰富，不存在资源短缺的风险。

大容量锂电池材料资源：锂离子电池材料包括锂正极材料、负极材料、电解液及隔膜材料等，具体涉及的材料主要有钴酸锂、锰酸锂、石墨和聚乙烯等。这些材料大部分属于化工产品，而且多数产品生产工艺已经成熟，材料资源丰富。而正极材料磷酸铁锂、电解液的主要核心电解质六氟磷酸锂，其中的锂和氟都属稀缺资源。根据美国地质调查局 2015 年发布的数据，全球已探明的锂资源储量约为 3 978 万 t。随着锂离子电池的开发，资源短缺将会是未来要面临的最大难题。但对我国而言，锂、氟资源储量在全球排名前列，具有显著的资源优势，为锂电池发展提供了有利条件。但锂电池核心部件所涉及的材料，我国产品较国外进口产品还有显著差距，仍主要依赖进口。例如，日本森田化学、关东电化和 SUTERAKEMIFA 是六氟磷酸锂的主要供应商。

风电材料资源：风电材料主要包括风力发电机组和齿轮箱材料、塔筒和机舱罩材料、风电叶片材料。其中，直驱电机原材料主要是稀土钕铁硼，用于生产稀土永磁材料，所以风电技术的发展未来对稀土的需求量将会很大，稀土资源将会是制约风电技术发展的关键资源。风电技术中其他部件涉及的材料基本不存在资源限制。如，塔筒材料一般选用强度较大且能够防腐蚀的，具有良好

抗震性能的钢板；风电机组材料的主要组成部分也是以钢铁为主的金属类材料；机舱罩是整个风电系统的保护装置，主要使用的是玻璃纤维 / 聚酯复合材料；涡轮机部件还有轮毂使用的也主要是聚酯树脂材料；叶片材料目前使用最广泛的是纤维增强型复合材料，包括玻璃纤维复合材料和碳纤维复合材料。这些材料大都属于传统材料，各国都具备成熟的制备工艺，产业规模和产品质量均有较好的保障。

储能材料资源：全球大容量储能技术呈现多元化发展的格局。电能可以转化为化学能、势能、动能、电磁能等形态储存。物理储能是指将电能转换为动能或势能储存的方式，主要有抽水蓄能、压缩空气蓄能和飞轮储能，其用到的材料均为传统材料，资源丰富。电磁储能直接以电磁能的方式储能，主要包括超导储能、超级电容器等。超导储能技术的核心在于超导材料，其大致可分为低温超导材料、高温超导材料和室温超导材料三类。低温超导材料主要有铌（Nb）、钛化铌合金（NbTi）、氮化铌（NbN）、锡化铌（Nb_3Sn）和镓化钒（V_3Ga）等。高温超导材料主要有镧钡铜氧体系（$LaBaCuO_4$）、钇钡铜氧体系（$YBa_2Cu_3O_7$）、铋锶钙铜氧体系（BSCCO）、铊钡钙铜氧体系（TBCCO）、铅锶钇铜氧体系（PSYCO）和钡钾铋氧体系（BKBO）。室温超导体仍在探索中。超导体中包括多种稀有金属元素，地球储量有限。超级电容器是一种极化电解质/电介质电容器，储能密度介于常规电容器与电池之间，是一种新型储能元件。电化学超级电容器采用活性炭材料制作成多孔碳电极，同时在相对的电极之间充填电解质溶液；电介质超级电容器目前研究较少。超级电容器主要材料为碳等，地球储量丰富。电化学储能是目前发展最快的储能技术之一，除铅酸、镍氢等常规电池技术外，还包括液流、钠硫电池等大容量蓄电池，用到的材料主要包括铅、镍、钒、石墨、钠、铝等，地球储量比较丰富。相变储能是利用某些材料在其物相变化过程中从外界环境吸收热量或者向外界环境放出热量的性能达到控制环境温度和能量存储的目的。相变储能介质按照成分可分为无机物和有机物（包括高分子）储能材料。无机固－液相变储能材料主要有结晶水合盐类、熔融盐类、金属或合金类等，使用较多的主要有碱及碱金属的卤化物、硝酸盐、硫酸盐、磷酸盐、碳酸盐及醋酸盐等。有机固－固相变储能材料是通过材料晶型的转换来储能与释能，目前已经开发出的具有经济潜力的固－固相变材料主要有多元醇类、高分子类和层状钙钛矿三类。有机固－液相变储能材料常用的有高级脂肪烃类、脂肪酸或其酯或盐类、醇类、芳香烃类、芳香酮类、酰胺类、氟利昂类和多羟基类等。

2.2.2 新能源材料应用潜力预测

太阳电池材料：多晶硅材料处于整个硅太阳电池产业链的上游，是硅太阳电池制造的物质基础。全球多晶硅产业在半导体和太阳能光伏产业的推动下迅速发展，尤其是光伏产业带动全球多晶硅产业的爆发式增长。1974 年，全球多晶硅产量只有 1 234t，到 2012 年全球多晶硅产量达到 23 万 t，38 年间，多晶硅产量增长近 190 倍。在多晶硅市场的驱动下，多晶硅价格持续走高，未来还将会有更多投资商进入这个行业，将大幅助推全球多晶硅产业的发展。预计在未来几年里，全球多晶硅将在“去产能化”的过程中，优化整合，产业集中度将进一步提高。

大容量锂电池材料：随着化石能源的不断枯竭和环境污染的日益严重，新能源汽车越来越受到各国政府的重视。主要经济体纷纷加大对新能源汽车的政策支持力度，制定规划推动行业发展。德国计划设立总额 20 亿欧元的项目以刺激电动车发展，包括提供新车购置补贴、扩大公共充电桩数量、鼓励政府部门使用更多电动车等。挪威电动车享受免除养路费、在特殊情况下使用公共交通车道和免费停车等优惠；首都奥斯陆将开放全球最大的电动车停车场，有 86 个免费充电桩。美国政府 2009 年推出的 7 870 亿美元经济刺激计划中，有 24 亿美元用于电池和电动车生产。美国消费者在购买电动车和混合动力车时可获得最高 7 500 美元的联邦税费减免。

新能源汽车用锂离子电池也因此成为相关材料的主要关注点。据有关报道，每兆瓦时容量的锂离子电池将需要 1 000t 碳酸锂、2 000t 正极材料、300t 六氟磷酸锂、3 000t 电解液及 50 万 m^2 隔膜。从以下各国电动汽车 2015 年的实际销量以及未来预期规划，可以预见锂电池材料的需求量巨大。

据欧洲汽车制造商协会 (ACEA) 公布的数据，2015 年前三季度欧盟替代能源汽车 (包括电动车、混动车及天然气燃料车和液化气燃料车) 总注册量同比增长 19.8%，其中电动车增速高达 82%，混合动力车增速为 22%。仅第三季度电动车注册量同比大幅增长 62.2% 至 1.75 万辆。

德国已拥有 2 400 个交流充电站、100 个直流快速充电站以及 3 万辆电动车，计划到 2020 年实现 100 万辆电动车上路的目标。

挪威是世界电动车占比最高的国家。2015 年新注册的新能源车达到 2.6 万辆，占注册新车总量的近 1/5。

美国 2015 年电动车总销量 40 万辆。加利福尼亚州计划到 2025 年 150 万辆

清洁能源车上路，而该州的电动车销量占全美电动车总销量的 40%。

根据机动车整车出厂合格证统计，2015 年我国累计生产新能源汽车 37.90 万辆，同比增长 4 倍。其中，纯电动乘用车生产 14.28 万辆，同比增长 3 倍，插电式混合动力乘用车生产 6.36 万辆，同比增长 3 倍；纯电动商用车生产 14.79 万辆，同比增长 8 倍，插电式混合动力商用车生产 2.46 万辆，同比增长 79%。

风电材料：如前所述，风电材料主要以传统钢铁材料和玻璃纤维 / 聚酯复合材料为主，因此，相关产业发展的潜力将主要依赖于全球风电市场的发展规模。根据世界风能协会（WWEA）的统计数据：2014 年全球风电市场成交量比 2013 年增长 40%，对风电的投资持续扩大，在拉丁美洲和非洲显示出风电在电力供应中的重要性。截至 2015 年 6 月，全球累计风电装机总量达到了 392 927MW，其中新增装机容量 21 678MW，同比增长 5.8%，风电已满足全球 4% 的用电需求。世界风能协会的调研报告指出，全球风能约为 2.74×10^{9}MW，其中可利用的风能为 2×10^{7}MW，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。欧洲风能协会（EWEA）和美国风能协会（AWEA）预测，今后 10 年世界风能产业将继续保持两位数的高增长速率，预计到 2020 年风力发电总量占世界发电总量的 12%，达 126GW。风电产业的蓬勃发展必将带动其相关材料和产业的迅速发展。

储能材料：中关村储能产业技术联盟（CNESA）的储能项目数据库统计信息显示，尽管 2013 年储能产业的发展遭遇了一些坎坷，例如领军企业 A123、XtremePower 破产，部分储能示范项目停运等，但总体说来，全球储能产业仍在稳步向前发展。CNESA 年度产业统计数据显示，截至 2013 年年底，除抽水蓄能、压缩空气储能及储热外，全球储能项目总装机容量达 73.6 万 kW，较 2012 年增长 12%，增速平稳。中国储能网统计数据显示，美国与日本仍然是最主要的储能示范应用国家，分别占 40% 和 39% 的全球装机容量份额。德国、英国、法国、西班牙等国 2013 年纷纷在电力输配、智能城市、海岛储能等领域积极开展、部署储能项目。储能项目覆盖区域以及市场规模正不断扩大，也因此与储能材料相关的产业将得以稳步发展。

2.3 新能源材料现行政策

2.3.1 科技项目政策

目前，许多发达国家发展新能源材料科技与产业的思路是：国家制定一定阶段的与新能源材料相关的具体发展目标和计划，在发展目标的框架下，制定一系

列的优惠政策，并通过市场经济手段鼓励各界投资和利用新能源材料。这些政策主要体现在目标引导、价格激励、财政补贴、税收优惠、信贷扶持、出口鼓励、科研和产业化促进等。

美国：1997 年宣布“太阳能百万屋顶发电计划”。2010 年实施“千万屋顶计划”和绿色能源制造业税收优惠政策。2012 年 2 月，美国国家科学技术委员会正式发布《先进制造业国家战略计划》，确定了纳米材料、纳米制造等八大主要支持领域，创建包括先进材料在内的四个领域的联邦政府投资组合，以调整优化联邦投资，促进先进功能材料的发展。截至 2013 年年底，美国联邦政府已投资超过 200 亿美元用于纳米技术研究，成效显著，成功奠定了其在纳米科学领域的基石。2014 年，美国总统科技顾问委员会公布了《向总统及国会提交的关于国家纳米技术计划的第五次评估报告》，指出纳米技术正处于一个重要的转折点。

欧盟：2012 年 7 月，欧盟出台了第七框架计划（FP7），其中的纳米科学、纳米技术、材料与新产品技术主题在 2013 年部署 12 项优先项目。同年 9 月，欧盟科研与创新理事会出台欧盟飞机制造业“2050 战略研发创新议程”，旨在集成纳米新材料技术、光电子技术和先进机械制造业技术等来推进绿色航天航空技术的研究。

德国：2012 年 6 月，德国联邦环境部、德国联邦职业与健康安全研究所与巴斯夫研究所联合启动实施了“纳米材料安全性”长期研究项目，了解各类纳米材料可能对周边环境产生的影响，通过定量化方法对纳米材料进行安全性风险评估。同年 11 月，德国联邦教研部宣布启动“原材料经济战略”科研项目，目的在于开发高效利用并回收原材料的特殊工艺，加强稀土、铟、镓、铂族金属等的回收利用，促进资源循环利用。

日本：1993 年制定新阳光计划，通过装机补贴、净电表制度、税收优惠等推动光伏产业发展。2011 年日本政府颁布《可再生能源特别措施法案》，强制推行光伏上网固定电价。

韩国：2012 年 6 月，韩国知识经济部和教育科学技术部表示，到 2020 年将投入 5 130 亿韩元（约合人民币 28.2 亿元）推动“纳米融合 2020 项目”。

2.3.2 强制总量目标

风电材料：2013 年全球风电年新增总装机容量 35GW，较 2012 年的 45GW 下降 22%，这是全球风电新增市场 18 年来的首次下降。全球累计装机容量达到 318.12GW，同比增长 12.5%。2013 年风电新增装机市场的下降主要是由

美国市场的锐减造成的。截至 2013 年年底，美国市场的新增总装机容量仅为 1GW，相较 2012 年创纪录的 12GW，2013 年的新增装机容量显著衰落。造成这一现象的原因是，2012 年年底美国的 PTC 政策中断，即到期前未及时宣布延续而造成市场悲观预期。但这一反常现象不代表美国，更不代表全球风电发展的大趋势。

全球风能理事会发布的《全球风电发展展望 2014》指出，到 2030 年全球装机将达 2 000GW，占电力能源结构的 17% ～ 19%，创造就业岗位 200 多万人，减排二氧化碳超 30 亿 t/a。到 2050 年风能将占 25% ～ 30% 的发电比重。如图 7-2-1 所示。

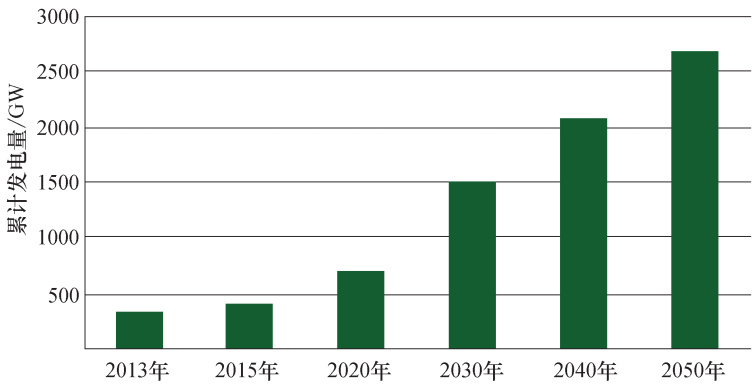


图 7-2-1　全球风电发展展望

数据来源：《2014 中国风电发展报告》。

大容量锂电池材料：新能源汽车产业化市场持续发展，拉升了对锂的需求，2015 年全球对锂的需求达到 17 万 t。这一走势在未来几年内将持续上扬，预计 2020 年将达到 27 万 t。国际上主要磷酸铁锂电池材料生产厂商有加拿大 Phostech、美国 Valence 和美国 A123 等，这三家知名企业掌握着较为成熟的量产技术。2011 年全球锂电正极材料销售达 59 470t，增长率 29.42%；锂电池负极材料销售 5 万 t。

太阳电池材料：国际上普遍认为，在能源战略中，太阳能光伏发电在众多可再生能源中具有最为重要的地位。根据欧盟委员会联合研究中心（JRC）的预计，到 2050 年，光伏发电要满足世界上 25% 的电力需求，到 2100 年达到 64%，太阳能将成为未来能源的主导，如图 7-2-2 所示。世界各国对太阳能产业的规划和预期强制限定了太阳能相关材料的需求量。

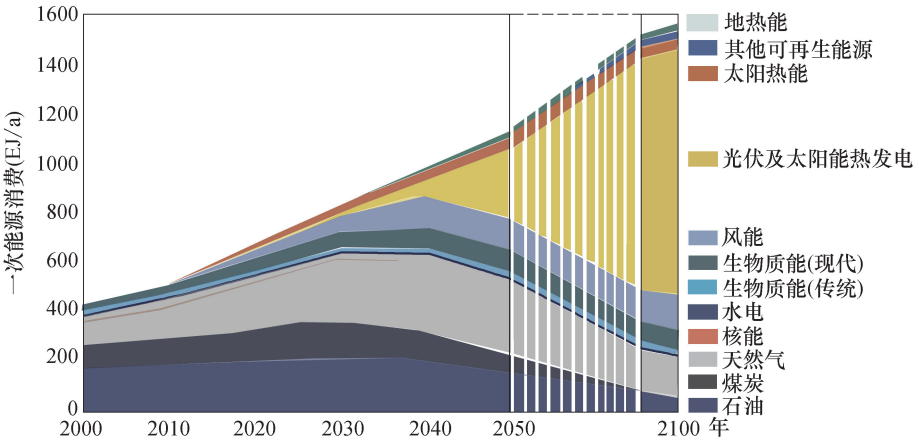


图 7-2-2　2000—2100 年全球能源结构变化预测

由于目前市场上 85% 以上的太阳电池仍是硅基太阳电池，光伏产业对多晶硅材料的消费需求非常庞大。2010 年欧洲光伏工业协会（EPIA）发布的《< 太阳能发电 > 第六版》预计在政策激励的加速成长模式下，2030 年全球光伏累计装机容量将会达到 1 845GW，到 2050 年达到 4 670GW。2012 年光伏产业的耗硅量为 22 万 t，假设太阳能光伏市场中 70% 的电池是晶硅电池，以每瓦太阳电池消耗硅量 5g 多晶硅计，到 2050 年，累计需要多晶硅 1 634 万 t，平均每年需要多晶硅 43 万 t。

储能材料：欧盟电网计划（EEGI）2012 年发布了《欧洲储能创新图谱》报告，对欧洲 14 个国家储能研究、开发与示范项目进行了统计分析。在过去 5 年，这些国家公共投资和受到欧盟委员会直接资助的项目总数达到 391 个，总投资额 9.86 亿欧元。德国在推动储能产业方面的动作较大，2013 年和 2014 年共计划投资 5 000 万欧元，对新购买储能系统的用户直接进行补贴，有效地促进了户用储能市场的发展。这一储能补贴计划的出台将使德国在未来 5 年的储能装机容量达到 2GW • h。

根据最新预测，到 2020 年，以输出功率计，全球储能系统累计安装量将达到 11.3GW • h 左右（图 7-2-3），接近届时全球间歇性可再生能源发电（风电和光伏发电）装机容量的 1%。其中，北美地区以装机容量 3.2GW • h 居首位，韩国（2GW • h），德国（1.9GW • h）和日本（1.6GW • h）分占二至四位。以电池容量计，全球储能系统累计安装量将达到 31.9GW • h 左右，相当于届时全球

电动汽车用电池累计产量的 20% 以上。美国仍占据头名，但德国上升至第二位，日本也超越韩国排名第三。

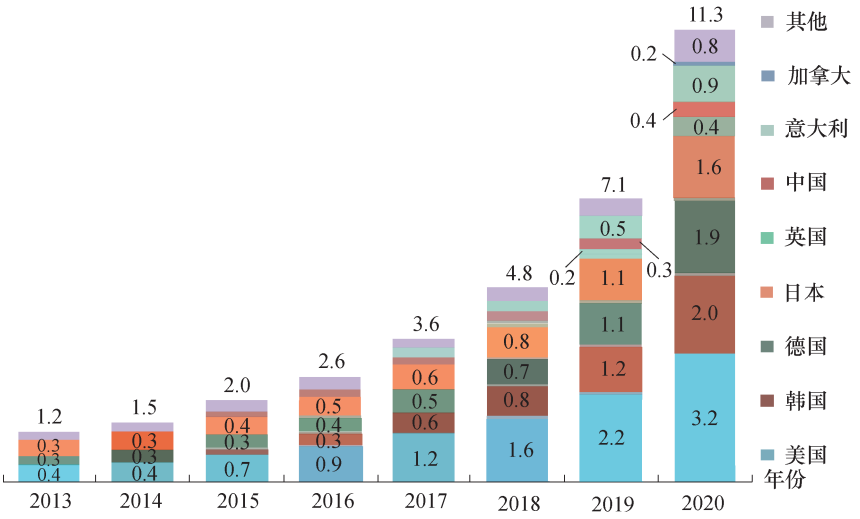


图 7-2-3　2013—2020 年全球分国家储能系统累计安装量预测 (GW)

2.3.3　绿色认证

绿色产品是必须遵循可持续发展原则，按照特定生产方式生产，经专门机构认定，达到认证标准的优质产品。EnviroKleen™ 是目前知名的国际绿色认证程序。由于各行各业标准不同，绿色认证标准需要有针对性地制定，通过认证的产品必须符合或超过标准中所规定的条例。产品绿色认证需要经过的测试：

污染性成分 —— 不会引起过敏反应或被认为是室内空气污染物；

致癌性成分 —— 不会导致癌症；

研究的原料 —— 不会引起有机体突变以及基因突变；

生殖毒性成分 —— 不会影响或抑制生殖系统；

环境持续 —— 一段时间成分要降解；

水生毒性成分 —— 不会使水污染；

其他危害特征 —— 测试存在有害物质；

符合 IFRA 指南 —— 产品成分符合安全使用浓度，避免被禁止的成分；

符合欧盟认证；

一般符合 EnviroKleen™ 标准。

新能源材料及其相关器件产品也应积极参加绿色认证标准，实现产品技术的环保、可持续发展。

2.3.4 专项补贴

专项补贴政策是世界各国为鼓励新能源及相关材料产业的发展所采取的经济激励措施。各国的补贴形式多种多样，但基本可以分为投资补贴、产品补贴和用户补贴三大类。

1. 投资补贴

投资补贴即对新能源材料相关项目开发投资者进行直接补贴。在没有明确制定价格政策的国家，投资补贴非常普遍，并且覆盖多种新能源材料相关领域。譬如希腊对所有新能源项目提供投资额 30% ～ 50% 的补贴，瑞典提供 10% ～ 25%，印度为风电领域提供 5% ～ 10% 的投资补贴。在制定了价格政策的国家，投资补贴常常与价格政策互补。例如，比利时对新能源电力实施了优惠电价政策，对除了发电以外的其他新能源相关项目提供 10% ～ 20% 的补贴。除了固定电价，西班牙还对投资成本较高的光伏领域提供 40% 的补贴。英国也在统一市场电价的基础上，为投资成本较高的海上风电相关产业提供 40% 的补贴。欧洲大多数国家还对个人投资或参股的新能源相关项目进行补贴。不论采取什么方式的补贴形式，都有详细的规定可以参照。补贴机制的优点是可以调动投资者的积极性，增加生产能力，扩大产业规模，缺点是这种补贴与企业的生产经营状况无关，不能起到刺激企业更新技术、降低成本的作用。

2. 产品补贴

产品补贴即根据新能源材料相关产品产量进行补贴。这种补贴的优点显而易见，即有利于增加产量，降低成本，提高企业的经济效益，这也是美国、丹麦、印度正在实施的一种激励措施。例如，美国在其能源政策法中制定的三项鼓励风电领域的措施之一是风电可以得到产品补贴，目前的补贴额度是 1.7 美分 /（千瓦时），为期 10 年。

3. 用户补贴

用户补贴即对产品用户端、消费者进行补贴。例如，欧洲大部分国家均对太阳能热水器的用户提供 20% ～ 60% 的补贴，澳大利亚为安装太阳能热水器系统的用户直接提供每套 500 澳元的补贴。对消费者的补贴也不是一成不变的，而是随着市场产业的发展和技术的进步而调整。例如，日本对家庭用户安装光伏产品

的补贴额度，起初是 40%，现在逐步降低到 10% 以下，并准备在适当的时候取消补贴。

2.3.5 税收减免

税收减免政策即直接对新能源材料领域实施税收优惠政策，包括减免关税、减免固定资产税、减免增值税和所得税（企业所得税和个人收入税）等。各国支持的方式不一样，技术领域也不同。例如，印度的风电整套产品进口关税税率为 25%，但对散件进口实行零税率；美国风电领域可以享受 1.7 美分/千瓦时的生产税抵扣；希腊对所有新能源项目和产品免税；丹麦对个人投资风电相关领域，葡萄牙、比利时、爱尔兰等国家对个人投资新能源相关项目均免征所得税；爱尔兰对一般企业投资风能、生物质能、光伏和水电等新能源相关领域项目资金免征企业所得税等。

除了税收减免，世界各国还积极采用低息或贴息贷款等政策来减轻企业负担，降低生产成本。目前，德国对风电和光伏相关项目实施了低利率贷款，利率从 2.5% ～ 5.1% 不等；意大利从 2001 年开始对分布式小型光伏系统提供相当于投资 85% 的免息贷款；西班牙制定了对个人和企业投资新能源材料项目的利息减免计划，2002 年减免后的利率为 2% ～ 4%，项目最高贷款额为 6 300 万欧元，当年提供信贷总额为 1.5 亿欧元，可用于补偿利息的总额为 1 200 万欧元。

2.4 主要国家和地区的新能源材料发展状况

2.4.1 各国新能源材料科技与产业规模

新能源材料产业在全球的分布较不均衡。发达国家（如美国、日本）和俄罗斯等在新能源材料产业上处于全面领先地位，韩国、新加坡等国紧跟其后，除中国、印度、巴西等少数国家之外，大多数发展中国家的新能源材料产业较为落后。但总体来讲，全球新能源材料产业规模一直保持增长态势。

凭借强大的科技实力，美国新能源材料产业技术突出、发展全面、产业链完整，汽车、军工、电气、航天航空等下游产业的发展，有效地带动了新能源材料领域的研发和生产，一直处于全球领先地位。其材料产业主要分布在五大湖区和太平洋沿岸地区；陶氏公司、道康宁、杜邦等公司都是全球领先的材料公司。欧洲新能源材料产业整体发展水平较高，主要分布在德国、英国和法国等发达国家，拥有一批实力雄厚的材料跨国企业，如拜耳、默克、巴斯夫。俄罗斯的矿产资源十分丰富，在能源材料、航空航天材料、化工材料、金属材料、超导材料、聚合材

料等领域一直保持世界领先地位。在发展新能源材料产业方面，俄罗斯的战略是一方面力求继续保持在这些材料领域的世界领先地位，另一方面大力发展对促进国民经济发展和提高国防实力有重要影响的新关键材料。日本综合能力最强，产业体系完整，产品质量优异，研发能力强，技术水平高，专利数量也最多，具有很好的专利布局。其在新能源材料领域的强项在于纳米玻璃、纳米金属、纳米涂层等尖端领域，其科技战略目标是保持产品的国际竞争力，注重实用性，在尖端领域赶超欧美。韩国把材料科技作为确保2025年国家竞争力的6项核心技术之一。为力争在短期内成为世界新材料科技产业强国，韩国在2025年构想中列出了为未来建立产业竞争力开发必需的材料加工技术清单，包括下一代高密度存储材料、生态材料、高性能结构材料、生物材料、自组装的纳米材料技术、未来碳材料技术等。

2.4.2 各国新能源材料资源特点

太阳电池材料资源：硅元素虽然地球储量丰富，但资源分布极不平衡。巴西硅储量最为丰富，次之为马达加斯加和危地马拉。加拿大、俄罗斯、美国、法国、意大利、印度、澳大利亚、土耳其、缅甸等30多个国家和地区有少量资源。

大容量锂电池材料资源：锂在地壳中的含量约为0.006 5%。根据美国地质调查局2014年发布的数据，全球已探明的锂资源储量约为3 950万t，玻利维亚的探明储量最多，为900万t，其次为智利（＞750万t）、阿根廷（650万t）、美国（550万t）和中国（540万t）。其他锂资源较丰富的国家包括澳大利亚、加拿大、刚果（金）、俄罗斯、塞尔维亚等。2013年各国锂资源储量如表7-2-1所示。

表7-2-1 2013年各国锂资源储量

国家	储量（万t）	探明储量（万t）	国家	储量（万t）	探明储量（万t）
玻利维亚		900	葡萄牙	6	
美国	3.8	550	津巴布韦	2.3	
阿根廷	85	650	加拿大		100
澳大利亚	100	170	刚果（金）		100
巴西	4.6	18	俄罗斯		100
智利	750	＞750	塞尔维亚		100
中国	350	540	总计	1 300	3 950

风电材料资源：风电材料中的关键资源为稀土材料。主要分布在中国、美国、俄罗斯、印度、澳大利亚、马来西亚、加拿大、南非、巴西及埃及等地。美国地质调查局 2014 年资料显示，世界稀土储量为 1.4 亿万 t(以稀土氧化物 REO 计)，其中，中国为 5 500 万 t，巴西 2 200 万 t，美国为 1 300 万 t，澳大利亚为 210 万 t，印度 310 万 t，马来西亚 3 万 t，其他国家合计有 4 100 万 t。

2.4.3 各国新能源材料发展趋势和战略规划目标

新能源以及新能源材料行业在能源短缺和环境污染的双重危机下迎来了难得的发展机遇。在新能源利用方面，世界各国普遍认为太阳能光伏是缓解能源危机最具潜力的途径，欧美等发达国家成倍增加在新能源材料基础研究领域的投入，并纷纷立法促进太阳电池的生产和应用。德国、美国、日本以及欧洲其他国家先后制定了太阳能发展计划，在目标引导、价格激励、政府补贴、税收优惠、信贷扶持、出口鼓励、科研和产业化促进等方面促进光伏的广泛应用发展。

温室效应和全球环境的恶劣，使电力储能材料受到越来越多的关注和重视。很多国家已经在法规法案中将储能材料的研发放到了重点位置，并有相应的产业政策予以支持。2009 年美国政府拨款 22 亿美元用于支持包括大规模储能在内的电池技术研发。美国能源部在 2011 年发布的战略计划中，已明确将储能上升到战略层面，并通过政府直接投资、调整税收、支持技术创新等手段促进储能研发和应用。2013 年下半年，美国和加拿大开始小范围试水调峰储能市场。经过 2011 年福岛核电站事故后，日本将推动户用储能作为产业扶持的重点，2012 年 4 月出台家庭储能系统补助金政策，2013 年 3 月又新设锂离子电池补贴计划，总预算为 100 亿日元。欧盟早在 2007 年制定的欧洲能源技术战略规划中明确指出，要实现 2050 年战略目标，在接下来的 10 年内需要突破低成本、高效率储能材料技术。

第 3 章 我国新能源材料科技与产业发展现状

新能源材料是新能源开发的物质基础，新能源材料开发是解决日益突出的能源和环境问题首先要面临的课题。近年来，我国十分重视对新能源材料基础和应用领域的投入和支持，“973”计划、“863”计划、科技攻关计划、高技术产业化专项等计划对绿色二次电池、燃料电池和太阳电池等能源器件及其关键材料的

研究开发和产业化均有较大投入。自 2003 年起，我国在新能源材料的研究和开发方面取得了一系列突破，产业发展也蒸蒸日上。

3.1 我国新能源材料科技与产业规模

国家发改委自 2000 年开始组织实施新材料高技术产业化专项，大力发展对国民经济有重要支撑作用的新材料，特别是受西方制约并对我国实行技术、产品封锁的新材料。国家“十一五”规划进一步明确指出，新材料产业要围绕信息、生物、航空航天、重大装备、新能源等产业发展的需求。《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中提到新材料产业重点发展新型功能材料、先进结构材料、高性能纤维及其复合材料、共性基础材料。新能源汽车产业重点发展插电式混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车技术。《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》中则提到“开发太阳能光伏发电新材料、新一代太阳电池、太阳能热发电和储热技术，太阳能热多元化利用技术、制冷和工业应用技术，风光储互补技术等。开发储能技术和装备。”

许多省市政府将新材料产业作为新的经济增长点列入议事日程，并将出台配套的产业政策给予重点支持，其中以北京、上海、西安、深圳、山东、重庆、武汉、江苏尤为突出。海门、江阴、长沙、铜陵、宁波、攀枝花、石嘴山等城市先后提出了建设成国家新材料基地的目标。科技部业已批准建立了新材料相关基地 60 多家，有力地推动了我国新材料产业的发展，并在一些领域形成了特色。新能源材料研发迎来了难得的、快速发展的历史机遇。

过去二十几年来，我国新能源材料企业跟风现象明显，产能过剩严重，浪费了大量的财力和人力。近年来，新能源材料进入了产业整合阶段。许多大型企业通过完整产业链，涉足上下游产业等方式降低经营成本、提高产品附加值以提高自身的竞争力，并以此增强企业整体盈利水平。在这样的潮流下，许多新能源材料企业成长为技术领先、具备较强生产能力的上市公司或知名企业。如宁波韵升公司形成了钕铁硼 — 八音琴 — 电机产业链布局；包头稀奥科公司进入储氢合金、电池极板以及镍氢电池三个生产领域，完善了其镍氢电池产业链；中信国安盟固利、青鸟华光、天威英利等公司早已进入下游电池领域，形成电池材料、电池生产上下游结合的产业链格局。整个新能源材料市场也由无序低价竞争逐步向以客户需求和市场为导向的方向发展。

我国的新能源材料产业发展还具有显著的区域特色，逐渐形成了特色产业集中区，行业之间的竞争有逐步转向地域竞争的趋势。例如，武汉、长春、广州、

西安等城市由于在光电材料上有较好的技术积累，在“中国光谷”称号归属上相互竞争。这种竞争促进了当地新能源材料产业的发展，也使我国新能源材料产业在市场调节下更加有序，形成区域差异。

3.2 新能源材料应用现状

我国新能源应用主要从 20 世纪 80 年代开始。此后，在国家需求和各种优惠政策的刺激下，大量的资金涌入新能源领域，引发了新能源相关产业的一轮发展热潮。金融危机后，新能源产业进入了较长时间的低谷期。在此期间，许多小企业逐渐退出市场，大企业进行了产业整合和升级，逐渐形成了相对稳定的市场格局。新能源材料产业的发展与新能源企业的发展息息相关。现如今，我国的新能源材料主要包括燃料电池材料、储能电池材料、氢能源材料、超导材料、太阳电池材料、风能相关材料和地热能相关材料等。

就具体应用现状而言，我国在储能电池材料、太阳电池材料和燃料电池材料方面都具备了良好的基础并逐步形成特色。例如，在储能电池材料方面，我国组织了镍氢电池和锂电池关键材料和技术的研究与开发以及电池技术的攻关，已形成从上游产品、原料制备、设备制造、电池加工和出口贸易以及下游产品的产业链。锂离子正极材料产品品质基本达到国际水平；在小功率镍氢电池产业化方面已经取得了非常大的进展，电池出口量以 30% 以上的增长率逐年增长；镍氢动力电池也已形成产业化。

总体而言，我国新能源材料产业及其应用情况与发达国家相比仍有相当大的差距。大多数关键材料的制备技术仍不具备，新能源器件中一些关键部件长期依赖进口。新能源材料的应用仍需要国家大力扶持相关企业的发展并大力支持基础研究。我国近年在新能源领域投入了大量的资金，约占世界新能源总投资的 1/5。可以预计，今后十几年里，风能、太阳能等新能源产业，包括其中涉及的新能源材料产业极有可能发展成为上千亿美元规模的产业。

3.3 新能源材料科技与产业现行政策

2005 年我国颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，新能源产业发展受到了财政的大力扶持。为促进可再生能源开发利用的技术进步，加快可再生能源产业的发展，中央政府将可再生能源开发利用的技术以及产业化的发展列入了科技发展与高技术产业发展的优先领域。2009 年，我国《可再生能源中长期发展规划》指出要认真贯彻《可再生能源法》，把发展可再生能源作为全面建设小康

社会和实现可持续发展的重大战略举措，加快水能、风能、太阳能和生物质能的开发利用，促进技术进步，增强市场竞争力，不断提高可再生能源在能源消费中的比重。2013 年 1 月 1 日，国务院正式印发《能源发展“十二五”规划》，指出我国要积极有序发展水电和风能、太阳能等可再生能源。能源科技创新和结构调整步伐加快，非化石能源和天然气在能源结构中的比重越来越大，世界能源将逐步跨入石油、天然气、煤炭、可再生能源和核能并驾齐驱的新时代。为了加快新能源和可再生能源产品的研发，鼓励新能源材料科技与产业的发展，由政府制定或批准执行了一系列的经济激励政策，包括各种形式的补贴、价格优惠、税收减免、贴息或低息贷款等。

3.3.1 财政补贴政策

新能源产业的战略地位毋庸置疑，但由于新能源面临技术、应用与消费观念上的问题，世界各国政府在新能源的发展中都对从事这些技术研究与市场化应用的研究机构和生产、销售企业进行一定程度的财政资金补贴。在我国，风电、太阳能、电动汽车是目前新能源领域的三大支柱，针对这三个产业链，国家自 2005 年开始陆续出台了多项资金扶持政策。

2005 年颁布的《中华人民共和国可再生能源法》指出，将自 2006 年 1 月 1 日起中央财政对可再生能源开发利用的科学技术研究、应用示范和产业化发展给予补贴。2006 年 5 月实施《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》（财建〔2007〕371 号），中央财政设立专项资金，采取无偿补助和贷款贴息两种措施重点扶持潜力大、前景好的石油替代（重点扶持生物乙醇燃料、生物柴油等），建筑物供热、采暖和制冷（重点支持太阳能、地热能等在建筑物中的推广应用），以及发电（重点扶持风能、太阳能、海洋能等可再生能源发电的推广应用）等可再生能源的开发利用。国家发改委于 2006 年 1 月 1 日颁布并实施《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》，对风力发电、太阳能发电、生物质发电（包括农林废弃物直接燃烧和气化发电、垃圾焚烧和垃圾填埋气发电、沼气发电）、海洋能发电和地热能发电实施价格补贴。如对生物质发电补贴电价标准为每千瓦时 0.25 元。2008 年，财政部制定了《风力发电设备产业化专项资金管理暂行办法》。中央财政安排专项资金支持风力发电设备产业化。2009 年 3 月，财政部、住房和城乡建设部出台了《关于加快推进太阳能光电建筑应用的实施意见》。意见指出，中央财政安排专门资金，对符合条件的光电建筑应用示范工程予以补助，以部分弥补光电应用的初始投入，同时鼓励地方政府实施相关的财政政策予以资金的扶

持。同时，财政部出台《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》，将补助标准原则上定为 20 元 /Wp。2009 年 7 月，财政部、科技部和国家能源局共同出台了《金太阳示范工程财政补助资金管理暂行办法》，重点支持光伏发电站项目的发展。办法指出，对并网光伏发电项目原则上按光伏发电系统及其配套输配电工程总投资的 50% 给予补助，偏远无电地区的独立光伏发电系统按总投资的 70% 给予补助。在新能源汽车领域，国家财政资金已进行了多年的财政支持和补贴。2010 年 5 月，财政部、科技部、工业和信息化部、国家发展改革委联合出台《关于开展私人购买新能源汽车补贴试点的通知》，确定在上海、长春、深圳、杭州、合肥 5 个城市启动私人购买新能源汽车补贴试点工作。新能源汽车的财政补贴方案针对消费者和充电设备环节，如纯电动汽车最高给予了 6 万元的补贴。

3.3.2 税收优惠政策

税收优惠是除财政补贴外的另一项间接补贴政策。2008 年 9 月，财政部、国家税务总局出台《关于执行资源综合利用企业所得税优惠目录有关问题的通知》，指出企业自 2008 年 1 月 1 日起以《资源综合利用企业所得税优惠目录》中所列资源为主要原材料，生产《目录》内符合国家或行业相关标准的产品取得的收入，在计算应纳税所得额时，减按 90% 计入当年收入总额。同年 12 月，财政部、国家税务总局出台《关于资源综合利用及其他产品增值税政策的通知》，规定：对利用风力生产的电力，实现的增值税实行即征即退 50% 的政策；对销售自产的综合利用生物柴油，实行增值税先征后退政策。

在中央政府行政性文件通知的要求下，在地方政府层面，针对新能源产业的各种税费和财政补贴政策也纷纷出台，绝大多数省份成立了新能源产业专项基金，对科研、设备招标、应用项目进行财政补贴。对新材料生产企业在开发新技术、新产品、新工艺过程中发生的研究开发费用，未形成无形资产计入当期损益的，在按照规定据实扣除的基础上，可按研究开发费用的 50% 加以扣除；形成无形资产的，按照无形资产的 150% 摊销。对相关企业从事技术开发、技术转让业务和与之相关的技术咨询、技术服务业务取得的收入，免征营业税。对相关企业行政事业性收费能免则免，不能免的按最低标准收取。

3.4 新能源材料科技与产业发展存在的问题

尽管经过多年的努力，我国新能源材料产业已经在产业规模、技术水平、发展机制等方面取得了巨大进步，具备了良好的发展基础，但依旧面临着很多问题。

1. 科技与产业布局

新能源材料产业发展模式粗放，基本处于资源型、劳力型发展模式，资源与能源利用效率低，资源优势转化为产业优势尚有较大差距，环境污染问题较严重。我国单位 GDP 所消耗的矿物原料比发达国家高 2 ～ 4 倍，二次资源利用率只相当发达国家水平的 1/4 ～ 1/3。科研成果转化为生产力水平差，我国稀土资源占世界总储量的 80%，产量占世界总产量的 70%，但其中的 2/3 以资源或初级产品的方式出口国外。

2. 技术创新

新材料产业自主创新能力不强，缺乏拥有自主知识产权的新材料产品与技术，在高端产品方面缺乏国际竞争力。一些高附加值的新材料依赖进口，部分产品的核心技术受制于人，成为相关产业发展的瓶颈。

另外，新材料单一品种多，技术集成能力较差，通用产品过剩，高性能、高附加值的产品相对较少；加工技术及装备制造水产低，造成长期过多依赖成套制备技术引进又不能有效消化吸收的被动局面。

3. 体系管理建设

该产业从业人员素质水平较低，创新能力较弱，不仅带来企业管理、产品质量及环境等问题，还产生市场应变能力差、资源利用率低、产品重复等问题，由此造成资源浪费，经济效益低下。

4. 政策保障

目前政策体系尚不完善，配套措施不能满足市场要求。我国出台的一些鼓励新能源材料发展的政策，实行效果不太理想。目前的法律法规对项目审批、转向资金安排、价格机制等统一的协调机制等也没有明确规定。我国亟须建立包括目标机制、竞争机制、补偿机制、交易机制、管理机制在内的一系列运行机制，以促进相关政策的制定与执行。

第 4 章　我国新能源材料资源潜力分析

4.1　资源开发利用现状

4.1.1　太阳电池材料资源

目前，全球的太阳能光伏电站市场上，主要有硅基电池（晶硅电池）和薄膜

电池、新型电池三大类。其中，硅基电池占市场近 90%，薄膜电池占 10% 左右。硅基电池包括单晶硅和多晶硅，其中多晶硅电池占主导地位，且技术最为成熟；薄膜电池主要有硅基薄膜电池、铜铟镓硒薄膜电池和碲化镉薄膜电池三大类。硅基太阳电池的关键材料主要是单晶硅、多晶硅，所对应的原料资源主要是硅砂（SiO_2）；硅基薄膜电池的原料主要是基材（玻璃、不锈钢）和各种气体（硅烷、氢气、三氯氢硅、硼烷、磷烷等）；铜铟镓硒薄膜电池和碲化镉薄膜电池的核心材料是吸收层材料，即铜铟镓硒薄膜和碲化镉薄膜，所对应的原料资源主要是铜、铟、镓、硒、碲及镉等。

1. 硅砂及硅烷

硅（Si）在自然界分布很广，地壳中约含 27.6%，是地壳中仅次于氧的第二丰富元素，属于类金属元素。硅在自然界一般很少以单质的形式出现，主要以二氧化硅和硅酸盐的形式存在，二氧化硅指硅石或硅砂，是多晶硅的主要原料来源。2011 年中国成为世界硅砂的主要生产国和消费国。硅按不同的纯度可以分为冶金级硅（MG）、太阳能级硅（SG）和电子级硅（EG）。一般来说，经过浮选和磁选后的硅石（主要成分是 SiO_2）放在电弧炉里和焦炭生成冶金级硅，然后进一步提纯到更高级数的硅。

目前处于世界主流的传统提纯工艺主要有两种：改良西门子法和硅烷法。这两种方法主要用于生产硅基太阳电池的核心原料——多晶硅，其中使用改良西门子法的产能占总产能的 75%，而使用硅烷法的产能占总产能的 25%，国内企业绝大部分采用改良西门子法。改良西门子法是以 HCl（或 H_2、Cl_2）和冶金级工业硅为原料，在高温下合成为 $SiHCl_3$，然后通过精馏工艺，提纯得到高纯 $SiHCl_3$，最后用超高纯的氢气对 $SiHCl_3$ 进行还原，得到高纯多晶硅棒。改良西门子法生产工艺相对成熟，生产的多晶硅质量高，一般能达到电子级（9 ～ 11N），但是电耗能够降到 60 ～ 70kW · h/kg。改良西门子法的缺点主要是 $SiHCl_3$ 转化率低，对能量利用率低。目前，我国骨干企业已掌握万吨级多晶硅及硅基电池全套工艺，光伏设备本土化率不断提高。但与国外先进企业相比，国内企业技术创新能力不强，基础研究资金投入太少，材料、装备等关键技术与国外先进水平尚存差距。

硅烷（SiH_4）是硅薄膜电池的基本原料。硅烷的制备方法很多，工业上主要采用的有四种方法：硅化镁法、还原法、电化学法、歧化法。硅化镁制备硅烷的方法是早期国际上普遍采用的一种生产方法，目前国内多使用该方法。该法的优点在于工艺简单、成熟，原料易得；其缺点是分离和回收液氨时能耗大，

SiH_4 收率相对较低，同时由于硅烷生产企业在工艺过程中有些细微之处没有处理好，导致硅化镁法生产不出高质量的硅烷气体。目前普遍认为，可实现大规模制备多晶硅的硅烷生产工艺是由 Union Carbide 公司发展的以工业硅粉与四氯化硅和氢气逐步反应生成硅烷的氯硅烷歧化法，按此法制备 1kg 硅烷的价格约为 8 ～ 14 美元。

2. 铜

铜在地壳中的含量约为 0.01%。美国地质调查局 2014 年资料显示，全球铜储量约为 6.9 亿 t，其中中国 0.3 亿 t。作为铜精矿的消费大国，我国的铜精矿资源较为缺乏，依赖进口解决内需。目前，高端超高纯金属铜靶材为国外几个大型跨国公司垄断。国内所需的超纯铜靶材基本需要进口，进口手续繁杂，价格昂贵。中国高纯铜金属的提纯技术与工业发达国家的差距较大。目前，能够提供的多数高纯金属，按照行业常规的全元素分析方法，尚不能满足集成电路对溅射靶材的质量要求。靶材中夹杂物的数量过高或分布不均，在溅射过程中常在晶圆上形成微粒，导致互连线短路或断路，严重影响薄膜的性能。而目前，国外主要半导体溅射靶材供货商已开发超高纯度（6N）铜溅射靶材，部分公司产品已上线生产。

3. 铟

铟是银白色略带淡蓝色的稀散金属，是稀有金属中的次贵金属，也是一种战略性金属。据 2011 年美国地质矿产调查报告，目前全球铟的保有量只有 1.6 万 t，我国的铟保有量约 1.3 万 t，居世界第一。目前我国已成为世界上名副其实的铟生产及出口大国，铟年产量占世界铟年产量的 1/3 以上，约为 120t，超过欧盟（77t）和加拿大（50t），居世界第 1 位。而国内铟消费量很小，年消费量不足 10t，主要原因是我国电子工业和信息产业落后，消费量有限。目前，铟的市场价格不稳定，受供给及消费的影响，国际市场价格降幅很大。铜铟镓硒薄膜材料中使用的铟为高纯铟，高纯铟是指含铟量达到 99.999%（5N）或以上的金属铟，而目前我国生产的高纯铟的含铟量只有 99.99 %。因此，高纯金属铟的研制及开发是一个务须解决的问题，5N 高纯铟提取技术中必须运用真空蒸馏工艺，但真空蒸馏工艺设备昂贵，而且要增加大量劳动力，使生产成本大大增加。目前，国内的铟生产企业普遍存在以下问题：①设备落后，控制精度差，自动化程度低，工人劳动强度大；②生产技术与发达国家相比较为落后，生产流程中先进技术占有的比例低；③铟的回收率低，再生铟的回收技术主要掌握在国外发达国家手中；④企业劳动生产率低；⑤环境污染严重。这些问题制约了我国铟生产企业经济效益的提

高和铟工业经济的发展。

4. 镓

镓在地壳中的含量为 0.001 5%。自然界中的镓分布比较分散，多以伴生矿存在，主要赋存在铝土矿中，少量存在于锡矿、钨矿和铅锌矿中。根据美国地质调查局 2014 年发布的数据，全球铝土矿中镓的储量超过 100 万 t，锌矿中还有一定储量的镓资源。虽然铝土矿和锌矿中所含的镓资源相对较多，但能从中开发回收的镓资源量却很少。根据美国地质调查局 2014 年发布的数据，2013 年全球精镓的产量约为 200t，粗镓产量约为 280t，世界粗镓产能为 470t，精镓产能为 300t，回收产能为 200t。中国是当今世界的四大镓生产国之一，同时也是精镓的主产国。据不完全统计，2012 年我国镓产量为 270t，产能约 330t，约占全球产量的 80%。当前我国镓产能严重过剩，2013 年我国镓的产能约 400 ～ 450t。我国也是镓主要消费国和进口国，2010 年全球镓消费量约为 280 ～ 300t，而我国镓消费量约为 100t，约占总消费量的 1/3，并且我国镓的消费量正在以每年 20% ～ 30% 的速度增长。目前，我国金属镓的消费领域包括半导体和光电材料、太阳电池、合金、医疗器械、磁性材料等，其中半导体行业已成为镓最大的消费领域，约占总消费量的 80%。随着镓行业快速发展，尤其是半导体行业和太阳电池行业的发展，以及我国政府对 LED 行业发展的推动，我国镓的消费量还将保持大幅增长态势。此外，因为我国国内金属镓回收能力较小，所以对金属镓的需求全部依靠原生镓支撑，这也将促进我国市场对原生镓需求量的大幅增长。目前，国内外制备高纯镓主要通过两条途径：一是直接以粗镓作为原料进行精炼提纯；二是将镓转化成某种镓化合物并对其进行精炼提纯，提纯后再还原成金属镓。高纯镓的生产方法主要包括电解精炼法、结晶法、真空精炼法、有机化合物热分解法、三氯化镓法等。我国具有高附加值的高纯镓产量相对较少，高纯镓生产技术与日本、美国等发达国家仍有较大的差距，国内高纯镓产量较低，远未满足市场需求。

5. 硒

硒在地壳中的含量为 0.05 $\times 10^{-4}$%，通常极难形成工业富集。全球硒资源储量约为 12 万 t，中国硒资源相对丰富，有 2.6 万 t。虽然目前已发现的硒矿物有百余种，但硒以独立矿物产出的量却很少，大多数硒都是作为铜矿加工过程中的副产品回收而来。我国是世界主要的硒资源国，也是硒主要消费国和进口国。2011 年，我国硒消费量约占世界总消费量的 40% ～ 50%，硒的进口量为

1 560t。2012 年，我国硒进口总量为 1 606t，主要从日本、韩国、比利时进口。有色金属冶金工业中，提取硒的主要原料为电解产出的阳极泥，其中居于首位的是铜电解的阳极泥，约占原料来源的 90%，其次是镍和铅电解的阳极泥。此外，有色冶炼与化工厂的酸泥（从烟气中回收得到的尘泥或淋洗泥渣）也富含硒，也可作为硒提取的原料。目前，硒的提取工艺主要分为火法提硒和湿法提硒。火法提硒工艺由于对原料的适应性强、操作简单，在工业生产中得到了广泛的应用，已经成为一种传统的提取硒的工艺，在相当长的一段时间内，火法提硒成为从铜电解阳极泥中提取硒的主导工艺。但火法提硒工艺也存在一些问题，如烟气量大、易于产生 SO_2 和 SeO_2 等有毒气体、能耗高等，严重影响其进一步推广应用。而湿法提硒工艺则具有能耗低、清洁环保、生产成本低等优点，因而湿法提硒工艺将逐渐替代火法提硒工艺，成为提取硒的主导工艺。硒的纯化方法包括蒸馏法、结晶法、化学法和联合法。工业上，对于硒中金属杂质的初步纯化来说，单级蒸馏应用最广泛，而精馏用于制备高纯硒。

6. 碲

碲的地壳丰度为 1×10^{-7}%，全球碲的总储量约为 10.6 万 t，远景储量为 16.1 万 t。中国伴生在铜矿床中的碲储量大约 1.39 万 t，可供回收利用的碲总量在 2.24 万 t 左右。碲主要来源于以下几个途径：从铜电解产生的副产品中回收制取，这是碲目前主要的来源，占碲年供应量的 60% 以上；从铅精炼所产生的副产品中回收；碲是金的伴生金属之一，随着碲价格的升高，越来越多的碲从贵金属冶炼过程中形成的副产品中回收；从生产碲化铋热电制冷装置产生的副产品和生产碲化镉薄膜太阳能的副产品中回收；随着碲化镉薄膜太阳电池的大规模应用，从废旧碲化镉薄膜太阳电池中回收碲将成为碲的重要来源之一；从碲矿中开采碲。由于碲（稀散金属之一）资源的独特性，全球年产量有限，行业内企业数量不多，大部分企业主要生产 3N 或 4N 纯度的精碲或碲化合物，极少数企业具备生产 5N 及以上纯度高纯碲和碲化镉的技术能力。2010 年全球碲产量在 600t 左右，主要碲产国有加拿大、日本、中国、秘鲁、美国、哈萨克斯坦、俄罗斯等国家。原材料采购能力、技术研发能力和生产能力决定了企业的综合竞争能力。国内外规模较大的企业包括中国的先导稀材、江西铜业、加拿大的 5NPlus、菲律宾的 PRM 等。在高纯碲产品方面，全球生产企业有先导稀材和 5NPlus。在精碲产品方面，全球主要生产企业有先导稀材和 PRM，其他多为规模较小的附属于铜冶炼企业的精碲生产商。

7. 镉

镉在地壳中含量约为 0.1 ～ 0.2mg/kg。中国是各国当中镉储量最为丰富的国家，以 92 000t 镉储量占全球总量的 18.4%。镉一般是作为锌精矿的伴生品进行生产的，废镍镉电池也是回收镉的一个重要来源。中国精镉的产量居全球首位，2012 年为 7 300t，2013 年为 7 400t，中国镉消费占全球总量的 33%。精镉的生产方法主要有两种：一是置换法，从处理镉原料所得含镉溶液中，用锌粉置换出海绵镉并加以精炼制取精镉；二是电解沉积法，从含镉原料制得的纯净镉电解液，经电解沉积生产金属镉，主要包括铜镉渣硫酸浸出、锌粉置换沉淀海绵镉、海绵镉溶解造液、镉电解沉积和镉熔铸等过程。由于电解沉积法生产镉的电耗大（每吨镉耗电约 1 300kW · h），许多工厂将电解沉积法改为置换法以节约电能。

4.1.2 先进储能材料资源

储能是指通过介质或设备，利用化学或者物理的方法把电能存储起来，并能根据需要把存储的能量以特定形式释放的过程。许多国家都将大规模储能材料和技术定位为支撑新能源发展的战略性措施。从目前储能产业的发展现状看，电化学储能是发展最快、应用最为广泛的储能方式。电化学储能主要是电池储能技术，目前以锂离子电池和镍氢电池为发展主流。锂离子电池的关键材料主要包括锂正极材料（钴酸锂、锰酸锂、镍酸锂、磷酸铁锂等）、负极材料（碳素材料）、电解液（六氟磷酸锂）和隔膜（聚乙烯、聚丙烯），所对应的原料资源主要是锂、镍、钴、锰、铁、钒、磷、稀土、石墨、萤石等，其中核心资源有锂、镍、稀土、天然石墨、萤石。镍氢电池的关键材料主要包括氢氧化镍正极活性材料、储氢合金负极活性材料和氢氧化钾电解液，所对应的原料资源主要是镍、稀土、钴、锰、铝、钛、锆、铬等，其中核心资源有镍、稀土。

1. 锂

锂在地壳中的含量约为 0.006 5%，已知的含锂矿物有 150 多种，主要以锂辉石、锂云母、透锂长石、磷铝石矿等形式存在。锂矿床主要有五种类型，即伟晶岩矿床、卤水矿床、海水矿床、温泉矿床和堆积矿床，目前开采利用的锂资源主要为伟晶岩矿床和卤水矿床。根据美国地质调查局 2014 年发布的数据，全球锂资源探明储量约为 3 950 万 t，我国已探明储量约 540 万 t，约占全球总探明储量的 13%，是锂资源较为丰富的国家之一，其中盐湖资源约占全国总储量的 85%，矿石资源约占 15%。目前，我国主要从锂矿石中提取锂，采用锂辉石、锂云母等固体锂矿石生产碳酸锂和其他锂产品的方法，主要生产工艺有石灰烧结法和硫酸

法，其中硫酸法是目前使用的主要方法。总体来看，我国的开采规模和采选技术与国外仍有一定差距，锂辉石矿也没有得到高效综合开发利用，锂精矿也存在品位低、质量不稳定、采选成本高等问题。因为国内锂矿石品位较低且生产规模较小，不能满足需要，所以近年来我国锂生产企业所需的矿石主要依靠进口，而澳大利亚则成为我国锂矿石的主要进口国。虽然我国也在积极开采盐湖锂资源，但由于资源、技术等因素的限制，开发速度相对缓慢。2011 年，我国金属锂的产量约为 1 700t，出口量约为 582t；碳酸锂的产量约 3 万 t，而进口量则因为国内锂电池材料生产需求旺盛超过了 8 000t。2011 年国内其他锂产品的生产也取得一定进展，其中高纯碳酸锂产量超过 1 500t，氟化锂产量超过 1 500t，丁基锂的产量约为 1 000t。2013 年，中国锂产量 4 000t。

2. 镍

世界镍资源储量十分丰富，在地球中的含量仅次于硅、氧、铁、镁，居第 5 位。镍矿在地壳中的含量为 0.018%，世界上镍矿资源分布中红土镍矿约占 55%，硫化物型镍矿占 28%，海底铁锰结核中的镍占 17%。其中，海底铁锰结核由于开采技术及污染海洋等因素，目前尚未实际开发。硫化矿大部分采用造锍熔炼，即将各种硫化镍矿石采用不同的火法冶金工艺炼成低镍锍，再将低镍锍用转炉吹炼成高镍锍，即硫化镍和硫化铜的合金，再经镍精炼厂的不同精炼方法生产出不同的镍产品。在开发利用方面，主要生产厂家有金川集团有限公司、吉林吉恩镍业股份有限公司、新疆有色金属工业（集团）阜康冶炼厂。其中金川集团是我国最大的电解镍生产商，主要生产镍、铜、钴、铂族贵金属、有色金属压延加工产品、化工产品、有色金属化学品等。目前，金川集团的年度镍产量居全球第四位，已形成年产镍 15 万 t 的生产能力。金川集团拥有的金川镍铜矿是世界著名的大型多金属共生硫化矿，探明资源量 5.2 亿 t。目前，金川集团保有矿石资源量为 4.3 亿 t，其中镍金属保有资源量 450 万 t。2012 年金川集团镍产量为 13.5 万 t。

3. 稀土

稀土元素在地壳中的含量并不稀少，总的克拉克值达到了 234.51%，稀土主要以独居石、氟碳铈矿、磷钇矿、淋积型矿、镧钒褐帘石等形式分布。中国是世界上主要的稀土生产国、出口国和消费国。据美国审计总署（GAO）统计，截至 2010 年，中国占全球稀土矿供应量的 97%、稀土氧化物 97%、稀土合金 89%、钕铁硼磁体 75%、钐钴磁铁 60%，其中 2009 年中国稀土产量达到 12 万 t。

2001—2009 年，中国企业向世界出口稀土年均数量稳定在 6 万 t 左右，2010 年和 2011 年稀土实际出口量均在 4 万 t 左右。这些出口量均高于中国商务部公布的出口配额，实际通过正规渠道出口的稀土仅为配额的一半左右。2013 年以来，政府对稀土私挖盗采的打击逐步落到实处，同时稀土价格大幅回落，国内稀土的真实产量处于下降通道。主要稀土企业有：包钢稀土、赣州稀土、广晟有色、中铝集团、五矿、厦门钨业、中色股份。

4. 天然石墨

在锂离子电池负极材料中，石墨类碳负极材料以其来源广泛、价格便宜，一直是负极材料的主要类型。

我国拥有丰富的天然石墨矿产资源，是世界上最大的天然石墨生产国，约占世界总产量的 55%。山东省莱西市为我国石墨重要产地之一，石墨探明储量 687.11 万 t，现保有储量 639.93 万 t。吉林省磐石市也是石墨产地之一，石墨储量 500 万 t。中国石墨矿石以鳞片状晶质类型为主，其次为隐晶质类型，致密状晶质石墨只见于新疆托克布拉等个别矿床中，工业价值不大。隐晶质石墨的工艺性能不如鳞片状石墨，工业应用范围也较小，矿石品位一般都较高，但矿石可选性差。矿物成分以石墨为主，伴生有红柱石、水云母、绢云母及少量黄铁矿、电气石、褐铁矿、方解石等，品位一般为 60% ～ 80%，灰分为 15% ～ 22%，挥发分为 1% ～ 2%，水分为 2% ～ 7%。我国已形成采矿、选矿、加工、提纯和制品一系列配套的综合性天然石墨产业。

5. 萤石

萤石又称氟石，主要成分是氟化钙（CaF_2），是工业上氟元素的最主要来源和氟化工的基础原材料，也是世界上二十几种重要的非金属矿物原料之一。我国地处环太平洋成矿带，萤石资源丰富，但探明可采储量只有约 2 100 万 t，占全球比重为 9.13%，居第三位。整体上看，我国萤石矿呈现四个特点：资源潜力巨大，但地质工作程度较低；分布相对集中，主要集中在我国的东部地区；单一型萤石矿床（点）多，但矿床规模小，伴（共）生型矿床（点）数少而储量大；贫矿多，富矿少，难选矿多，易选矿少。从世界范围看，近几年萤石产品的需求呈相对平衡、适度增长之势。据美国地质调查勘探局的统计，全球对萤石需求年增长率为 2.2%，对氢氟酸需求年增长率为 10%。从使用领域看，欧美主要将萤石用在氟化工业上，我国主要用于化工、冶金、建材行业，三大行业约占国内萤石消费量的 95% 以上。目前我国大大小小的萤石生产厂家有 200

多家，产能都在 2 万 t/a 以下。由于对萤石的开采、利用缺乏统一规划和有力监管，资源回收率很低，一般只有 40% ～ 50%，少数仅为 18%，大量氟化钙品位为 30% ～ 40% 的矿石被抛弃，资源浪费惊人。另外，我国萤石矿山企业规模小、技术落后、机械化程度低、不注重技改投入，导致矿山生态环境恶化。国家为保护国内萤石资源，提高萤石利用效率以及萤石下游产品的附加值，实现萤石资源的结构升级，会倾向于把萤石资源整合到具有规模优势和技术优势的大型国有企业，以加强对萤石资源的有效控制。因此，具有萤石资源基础的大型国有企业未来将成为萤石资源整合的主角。

化学元素氢，在元素周期表中位于第一位，是所有原子中最小的。氢是宇宙中最常见的元素，氢及其同位素占太阳总质量的 84%，宇宙质量的 75% 都是氢。氢具有高挥发性、高能量，是能源载体和燃料，同时氢在工业生产中也有广泛应用。现在工业每年用氢量为 5 500 亿 m^3，氢气与其他物质一起用来制造氨水和化肥，同时也应用到汽油精炼工艺、玻璃磨光、黄金焊接、气象气球探测及食品工业中。液态氢可以作为火箭燃料，因为氢的液化温度为 -253℃。

4.1.3 风电材料资源

风电材料主要包括风电齿轮箱材料、塔筒和机舱罩材料和风电叶片材料。齿轮箱、塔筒所用材料主要是各类钢板，电机所用材料主要是汝铁硼永磁材料，机舱罩所用材料主要是玻璃纤维/聚酯复合材料，风电叶片所用材料主要是纤维增强型复合材料，包括玻璃纤维复合材料和碳纤维复合材料（基体材料主要是环氧树脂），所对应的原料资源主要是纯碱、芒硝、石灰石、稀土汝铁硼和用于制备环氧树脂的有机物。重点介绍芒硝资源的开发利用现状。

芒硝，也作碰硝、芒消、马牙硝、盐硝、盆硝，是含有结晶水的硫酸钠的俗称。芒硝是一种天然矿产资源，产于干涸的盐湖中，与石盐、石膏等共生。世界上芒硝湖的分布，以中国和俄罗斯较多，我国芒硝资源储量居世界首位。根据国土资源部数据，2014 年芒硝储量为 1 170.9 亿 t。

资料显示，我国的无水芒硝（Na_2SO_4）生产企业大大小小有几百家，生产能力数百万吨，近年来，全国 Na_2SO_4 的产量每年以 7% ～ 8% 的速度增长。但是，据 2001 年美国地质调查局估计，全球 Na_2SO_4 总产量约 550 万～ 600 万 t，其中还有 150 万～ 200 万 t 是硫酸钠副产品。近年来，美国芒硝用量逐年下降，因此，Na_2SO_4 市场前景不容乐观，大力开发芒硝资源新用途，迫切而重要。据文献记载，芒硝是最早用于化学制碱的原料，索尔维制碱法是全球最重要的化学制碱法。但

是，索尔维制碱法也有其无法克服的缺点：原料利用率低，废液排放量大。因此，多年来，国内外研究人员一直在探索芒硝制碱的新途径，仅国内近年来申请的芒硝制碱专利就达二三十份之多，但大多还集中于传统的方法。国外研究近年来主要集中于电化学方法，这大概是国内外电力成本及制膜技术上的差异所致。我国有丰富的芒硝资源，也有丰富的钾资源，可硫酸钾却长期短缺，因此，研究将芒硝转化为硫酸钾很有意义。近年来，国内有多家科研单位从事芒硝转化生产硫酸钾的研究，并取得了积极成果。原化工部长沙化学矿山设计研究院开发的芒硝和KCl 制硫酸钾工艺和中科院青海盐湖所开发的以芒硝和光卤石为原料制硫酸钾工艺均已通过万吨级工业规模试验。

总体来看，我国的新能源材料资源相对丰富，但是资源开发利用程度相比于国外先进技术较为落后，且缺乏政府监控、政策规范引导不到位。

4.2 资源开发潜力

4.2.1 太阳电池材料资源

1. 硅砂

我国的天然硅砂除上海、天津市以外，其他省、市、自治区均有产出。质量较好的有广东、广西、青海、福建、云南、四川、黑龙江等省区；质量最好的有海南、江苏。广西大化瑶族自治县境内的地下硅矿储量在 2 亿 t 以上。其中，二氧化硅含量达 99.5% 以上，可达一级品；其他杂质如铁、铝、钙等元素含量为 0.04% ～ 0.07%，均在一级指标范围内，矿体类型简单、矿脉大、开发容易、价值高。湖南省宁乡县西部青山桥硅石矿，分布范围均位于沩山花岗岩岩体内，属三叠纪花岗岩。全乡共有八个矿体，以天台山和永宁禾子冲两条矿体的规模最大，石桥铺、永宁尖峰顶、田心铺三条矿体规模次之。共探明脉硅石 C 级储量 2 700 万 t 以上，D 级储量 1 000 万 t，共计储量 3 726.688 万 t，加上潜水面以下的矿体，其远景储量达到 5 000 万 t。矿石放射性强度为 16 ～ 26 γ，电阻率值为 3 768 ～ 17 140 Ω · m，含硅纯度平均在 98% 以上。天台山矿体矿石熔点达到 1 760℃，远高于其他地方的同类产品，且土壤覆盖少，易于开采。四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康县具有优越的成矿地质条件，其中硅矿 250 余万 t，品位高达 99.2%。安徽、辽宁、江西、河南、湖北省内均有一定量的硅矿分布。

由于石英砾石、天然硅砂的储藏量属于我国国民经济的非支柱性矿藏资源，也是我国多种未探明储藏量的非金属矿藏，因而全国的储藏量大部分是预测估算

数或未知数，在开采和使用方面要考虑可持续发展的原则。我国已探明的玻璃硅质原料储量见图 7-4-1。

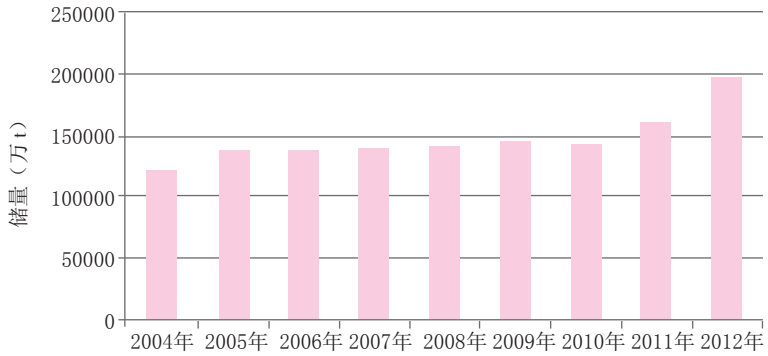


图 7-4-1　2004—2012 年我国玻璃硅质原料储量

数据来源：国土资源部。

2. 铜

中国铜生产地集中在华东地区，该地区铜生产量占全国总产量的 51.84%，其中安徽、江西两省产量约占 30%，云南、内蒙古也是我国铜矿主要产区。2013 年，我国主要矿产勘查新增铜矿 314 万 t。2004—2012 年我国铜矿储量见图 7-4-2。但是我国铜矿自然禀赋不佳，未发现优质矿床。在已发现的矿床中，大多数矿体复杂、品位低、开采成本高、开采难度大，探明的矿体中相当一部分是“呆矿”。铜矿的平均品位只有 0.87%，品位大于 1% 的储量只占资源储量总量的 35%；我国斑岩型铜矿的平均品位为 0.5%，低于智利、秘鲁的 1% ～ 2%；砂岩型铜矿的平均品位为 0.5% ～ 1%，低于非洲刚果和赞比亚的 2% ～ 5%，适合采用浸出 - 萃取 - 电积工艺的斑岩型铜矿床少，生产成本难以降低。

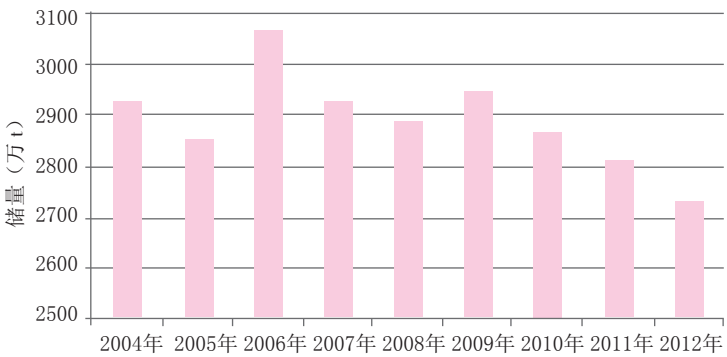


图 7-4-2　2004—2012 年我国铜矿储量

数据来源：国土资源部。

3. 铟

中国的铟资源储量居世界首位，主要伴生于铅锌矿床和铜矿金属矿床中，保有储量为 13 014t，分布于 15 个省区，主要集中在云南（占全国铟总储量的 40%）、广西（31.4%）、内蒙古（8.2%）、青海（7.8%）、广东（7%）。

铟资源稀少而分散，没有独立的可供直接开采的工业矿床，很多都存在于闪锌矿、铜铅硫化矿及锡矿中，其他含铟矿物质还有明矾石、钼辉石、菱铁矿等。铟在地壳中的丰度为 0.1×10^{-6}，虽与银相近，但因提取技术难度大、成本高，产量一直较低，还不到银产量的 1%。目前地球上铟产量的 90% 来自铅锌冶炼厂的副产物，主要是从锌、铅、铜的冶炼熔渣、阳极泥和浮渣中通过富集加以回收。

4. 镓

目前我国铝土矿和锌矿中所含的镓资源相对较多，但能从中开发回收的镓资源量较少。截至 2008 年年底，我国共探明镓矿矿区总数 166 个，在全国 25 个省（市、区）均有分布，资源储量为 13.66 万 t，基础储量为 0.71 万 t（根据报道，2005 年我国科研人员在内蒙古准格尔发现了一个世界上独特的与煤伴生的超大型镓矿床，据估算该矿床镓的保有储量为 85.7 万 t）。镓资源储量较多的省份除内蒙古外，还有广西、贵州、河南、山西、云南。从镓资源分布类型来看，广西、贵州、河南、山西、吉林、山东等省区的镓主要存在于铝土矿中，云南、黑龙江等省的镓主要存在于锡矿或煤矿中，湖南等省区的镓主要存在于闪锌矿中。2011 年，我国将镓列为战略储备金属，计划在适当的时候对镓进行战略储备。

5. 硒

我国的硒资源相对丰富，且硒资源主要是伴生硒，赋存在黄铜矿、黄铁矿、汞铅矿中，有时也存在辉钼矿、铀矿中。湖北恩施市是迄今为止全球唯一探明独立硒矿床所在地，硒矿蕴藏量居世界第一。截至 2007 年年底，全国保有硒资源储量为 15 600t，其中基础储量 330t，资源量 15 270t。全国 18 个省区均有硒资源，其中甘肃省硒资源储量最多，约 6 440t，其次为广东 1 730t、黑龙江 1 680t、湖北 1 280t、青海 1 230t。

总体看，我国硒资源分布不均衡，有些地区土壤硒含量很高，有些地区则出现缺硒现象。我国早期发现的富硒地区有湖北省恩施市、陕西省安康市、贵州省开阳县、浙江省龙游县、山东省枣庄市、四川省万源市、江西省丰城市、安徽省石台县等。近几年发现的富硒地区有青海省海东地区的平安—乐都一带、山西省的主要农业区、江西省鄱阳湖地区、湖南省慈利县和桃源县、浙江省杭嘉湖平原

和宁绍平原地区、广东省佛山市、海南省澄迈县等。我国缺硒省份有 22 个，约占全国总面积的 72%，其中 30% 为严重缺硒地区。

6. 碲

碲的地壳丰度为1×10^{-7}%，尚未发现碲的独立工业矿物。碲矿资源分布稀散，多伴生于其他矿物中或以杂质形式存在于其他矿中。中国四川石棉县大水沟碲铋硫铁矿是迄今为止世界上有报道的唯一“碲独立原生矿床”，被称为仅次于大熊猫的“第二国宝”。碲主要与黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等共生，含量仅 0.001% ～ 0.1%；主要碲矿物有碲铅矿、碲铋矿、辉碲铋矿以及碲金矿、碲铜矿等，这些矿物很少见，均无工业价值。目前主要从电解铜的阳极泥，炼锌的烟尘及金、银、铅等冶炼尾料中提取制备。根据我国的勘探数据显示，我国现已探明伴生碲储量在世界处于第三位。伴生碲矿资源较为丰富，全国已发现伴生碲矿产地约 30 处，保有储量近 1.4 万 t。碲矿区散布于全国 16 个省（区），但储量主要集中在广东、江西、甘肃等省。我国的碲矿也主要伴生于铜、铅锌等金属矿产中。据主矿产储量推算，我国还有未计入储量的碲矿资源约 10 000t，这将改变碲资源的分布格局并有可能使我国成为一个碲矿资源大国。根据国土资源部数据，截至 2011 年年底湖北省碲矿矿区数 2 个，查明资源储量 116t，保有资源储量 43.48t；四川大水沟碲矿探明的碲储量为 328t，马家沟碲矿探明的碲储量为 437t。未来随着全球铜产量的增加和碲回收率的提高，碲的产量增长速度将大大提高。据推算，如铜电解产生的副产品中 80% 的碲被回收，则 2014 年从铜电解副产品中回收的碲产量可达 1 059t，2020 年将达到 1 295t，将大大高于目前碲的产量。

7. 镉

镉的单独矿物不多，一般作为锌的伴生矿存在。在普通的锌矿中，锌与镉的比例范围是 200 ∶ 1 至 400 ∶ 1 之间。闪锌矿是锌矿中最具有经济开采价值的矿物，掺杂其他矿物的量最少，镉与锌的化学性质有些相似，所以在闪锌矿的晶格中经常替代锌。镉矿中的硫镉矿，经常与风化的闪锌矿和纤维锌矿关联很大，但是程度不深。根据美国地质调查局 2014 年公布的数据，截至 2013 年年底全球镉储量总量为 500 000t，中国是镉储量最丰富的国家，以 92 000t 镉储量占全球总量的 18.4%；其他蕴藏镉资源较丰富的国家有秘鲁、墨西哥、印度、俄罗斯、美国等。资源分布特点：多与铅矿、锌矿等以共、伴生形式存在；我国镉矿主要分布在中部、西南部及华东地区。

4.2.2 先进储能材料资源

1. 锂

我国花岗伟晶盐锂矿床主要分布在四川、新疆、河南、江西、福建、湖南、湖北。其中，江西宜春锂云母基础储量达 63.7 万 t；四川省康定甲基卡伟晶岩型锂辉石矿床是世界第二大、亚洲第一大的锂辉矿，氧化锂的含量为 1.28%，储量为 118 万 t。我国的锂盐湖资源主要分布在青海和西藏，其盐湖锂资源储量占全国锂资源总储量的 80% 左右。青海的锂资源主要赋存于硫酸盐型盐湖中，集中分布在柴达木盆地的察尔汗盐湖，目前正在开发的是东台吉乃尔湖和西台吉乃尔湖，储量约为 9 万 t 和 48 万 t。西藏的锂资源主要赋存于碳酸盐型盐湖中，集中分布在藏北仲巴县扎布耶盐湖。该盐湖为世界罕见的硼锂钾铯等综合性盐湖矿床，其中的锂、硼均达超大型规模，是全球第三大百万吨级盐湖，锂的资源含量达 153 万 t，含锂量仅次于 Salar de Atacama 和 Salar de Uyuni，同时也是全球镁锂比最低的优质含锂盐湖。

2. 镍

在我国，硫化物型镍矿资源较为丰富，2012 年已探明镍储量为 260.9 万 t，主要分布在西北、西南和东北的 19 个省份，其保有储量分别占全国总储量的 76.8%、12.1%、4.9%。同时，我国也是红土镍矿资源比较缺乏的国家之一，全国红土镍矿保有量仅占全部镍矿资源的 9.6%，而且国内红土镍矿品位比较低，开采成本比较高。2004—2012 年我国镍矿储量见图 7-4-3。

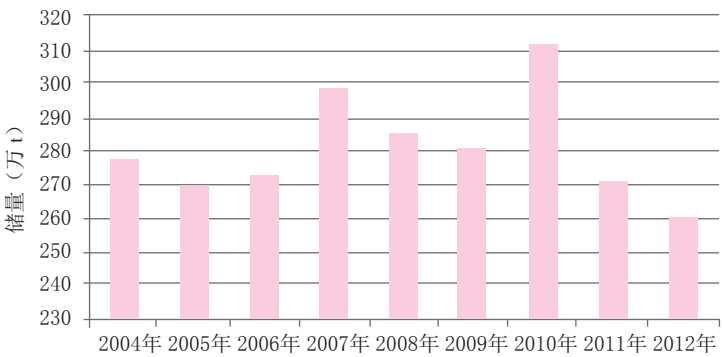


图 7-4-3 2004—2012 年我国镍矿储量图

数据来源：国土资源部。

3. 稀土

据 2012 年 6 月发布的《中国稀土状况与政策》白皮书中数据，2009 年我国

稀土储量 1 859 万 t，约占世界总储量的 23%。我国是世界稀土资源储量大国，不但储量丰富，且还具有矿种和稀土元素齐全、稀土品位及矿点分布合理等优势，稀土资源成矿条件十分有利、矿床类型单一、分布面广而又相对集中。全国稀土资源总量的 98% 分布在内蒙古、江西、广东、四川、山东等地区，形成北、南、东、西的分布格局，并具有北轻南重的分布特点。轻稀土主要分布在内蒙古包头的白云鄂博矿区，其稀土储量占全国稀土总储量的 83% 以上，居世界第一，是我国轻稀土主要生产基地。离子型中重稀土则主要分布在江西赣州、福建龙岩等南方地区，尤其是在南岭地区分布可观的离子吸附型中稀土、重稀土矿，易采、易提取，已成为我国重要的中、重稀土生产基地。中国虽然稀土资源丰富，但由于过去多年的大量出口及猖獗的非法开采，稀土资源储量已经明显下降，尤其是中重稀土储量下降尤为惊人。

我国主要稀土矿有：白云鄂博稀土矿、山东微山稀土矿、冕宁稀土矿、江西风化壳淋积型稀土矿、湖南褐钇铌矿和漫长海岸线上的海滨砂矿等。白云鄂博稀土矿与铁共生，主要稀土矿物有氟碳铈矿和独居石，其比例为 3 ∶ 1，都达到了稀土回收品位，故称混合矿，稀土总储量 REO 为 3 500 万 t，约占世界储量的 38%，堪称世界第一大稀土矿。微山稀土矿和冕宁稀土矿是以氟碳铈矿为主，伴生有重晶石等，是组成相对简单的一类易选的稀土矿。江西风化壳淋积型稀土矿是一种新型稀土矿种，它的选冶相对较简单，且含中重稀土较高，是一类很有市场竞争力的稀土矿。我国的海滨砂也极为丰富，整个南海的海岸线及海南岛、台湾岛的海岸线可称为海滨砂存积的黄金海岸，有近代沉积砂矿和古砂矿，其中独居石和磷钇矿在处理海滨砂回收钛铁矿和锆英石时作为副产品加以回收。

4. 天然石墨

我国拥有丰富的天然石墨矿产资源。工业上将石墨矿石分为晶质（鳞片状）石墨矿石和隐晶质（土状）石墨矿石两大类。晶质石墨矿石又可分为鳞片状和致密状两种。近二十年，我国晶质石墨储量呈增加态势，2014 年查明资源储量达到 2.2 亿 t，较 2010 年的 1.85 亿 t 增长 18.9%。但是大鳞片优质石墨储量减少到不足 500 万 t。晶质石墨分布在黑龙江（储量 1 348 万 t）、山东（储量 892 万 t）和内蒙古（储量 271 万 t）等 20 个省（自治区）。黑龙江萝北县云山石墨矿已查明资源储量 4 200 万 t，居全国第一。山东省莱西市南墅石墨矿经过 80 多年开采，目前保有储量 270 万 t；山东平度市有 5 个石墨矿区，晶质石墨保有储量 600 万 t。内蒙古兴和县有 6 个石墨矿区，保有储量 114 万 t。湖北宜

昌有 3 个石墨矿区，查明资源储量 1 232 万 t。四川南江县有 3 个石墨矿区，查明资源储量 1 754 万 t。隐晶质石墨矿石保有储量 1 190 万 t，基础储量 2 280 万 t，资源量 3 590 万 t，平均品位 55% ～ 80%。隐晶质石墨资源分布在湖南（储量 933 万 t）和吉林（储量 111 万 t）等 9 省。湖南已发现隐晶质石墨矿区 5 处，桂阳县荷叶石墨矿区基础储量 1 240 万 t，资源量 1 530 万 t；郴州鲁塘石墨矿区基础储量 353 万 t，平均品位 75%。吉林磐石市已发现隐晶质石墨矿区 4 处，基础储量 130 万 t，资源量 220 万 t，平均品位 55% ～ 67%。

5. 萤石

我国地处环太平洋成矿带，萤石资源丰富，2014 年查明资源储量 2.23 亿 t。虽然资源基础储量丰富，但探明可采储量并不高。

我国萤石矿包括单一型萤石矿床和伴生型萤石矿床。单一型萤石矿床大多储量小，一般为数万吨至数十万吨，只有内蒙古自治区四子王旗苏荣查干敖包萤石矿区储量较大，矿石储量约 2 000 万 t。这类矿床的矿体形状以石英 - 萤石组合的脉状矿床为主，品位较高，CaF_2 质量分数均为 50% ～ 80%，个别甚至大于 90%。伴生型萤石矿床包括与钨锡矿伴生型、与铅锌伴生型、与稀土 - 铁伴生型、与石英伴生型、与硫化物伴生型、与石英 - 重晶石 - 方解石伴生型等多种。该类矿床的成矿机理复杂，矿体形状一般为脉状、似层状、层状或蚀变岩型矿床。我国矿产伴生萤石矿区 50 多处，湖南省郴县柿竹园钨锡钼铋矿伴生萤石矿区资源量达 6 500 万 t，是世界第一大伴生萤石矿。与钨锡矿、铅锌、稀土 - 铁伴生的脉状或蚀变岩型矿的 CaF_2 质量分数一般为 15% ～ 20%，矿床规模常为大型和超大型，主要分布在湖南临湘、郴州、内蒙古白云鄂博等地。与石英、硫化物、石英 - 重晶石 - 方解石组合的脉状、似层状、层状矿床的 CaF_2 质量分数一般为 30% ～ 60%，矿床规模从小型到超大型均有，主要分布在四川、贵州、云南、内蒙古等地。

氢是自然界存在最普遍的元素，主要以化合物的形态贮存于水中，而水是地球上最广泛的物质。据推算，如把海水中的氢全部提取出来，它所产生的总热量是地球上所有化石燃料放出热量的 9 000 倍。

4.2.3 风电材料资源

重点介绍芒硝的资源潜力。工业矿物原料所指芒硝，常包含无水芒硝和钙芒硝，用以制取硫酸铵、硫酸钠、硫酸及硫化钠等化工原料，其中用于制造洗衣粉的芒硝占总用量的 65% ～ 70%。我国芒硝资源十分丰富，资源储量居世界首位，

已探明储量比世界其他各国的总和还要多。根据国土资源部数据，2014 年储量为 1 170.9 亿 t，主要分布在西藏、内蒙古、黑龙江、山西、吉林等，湖北省的储量居全国之首。

我国的芒硝矿资源（不包括各种副产芒硝）主要有两类：盐湖芒硝和钙芒硝，其在全国芒硝总储量中各占近半，盐湖芒硝主要集中于青海、内蒙古、西藏、新疆四省区，钙芒硝主要集中于四川、青海、湖南、云南、湖北、江苏等省区。全国已探明 4 个 10 亿 t 以上的超大型矿床，分别是：四川新津县金华矿区普查区、青海互助县硝沟钙芒硝矿、青海茫崖镇汗斯拉图芒硝矿、青海茫崖镇大浪滩矿田梁中矿。

总体来看，在我国新能源材料对应的主要原料资源中，硅砂、天然石墨、萤石、芒硝资源储量十分丰富；镓、硒、镉、锂资源较为丰富；铜、镍资源相对匮乏；铟、碲资源都是稀散金属，其中铟属于战略性金属，二者在我国的相对储量较大；稀土元素在地壳中的含量并不稀少，但由于稀土在高科技领域中的应用广泛，所以是一种战略性资源，我国的稀土储量相对较为丰富。

4.3 资源可持续性

在新能源材料所使用的原料资源中，部分资源储量有限，开发难度大，属于战略性资源，为了实现可持续性，一般都存在再回收利用产业。对于储量相对丰富的资源，其可持续性也都有一定的年限，短则几十年，长则数百年，所以任何新能源材料的矿产资源都普遍具有不可再生性。同时，我国资源保护政策和储备战略的缺失，导致资源开采过度，产能过剩，出口价格偏低，资源流失严重，破坏了资源的可持续性。

1. 铜

铜具有 100% 可回收性，在反复回收利用中无任何性能损失。与铜的开采（初级生产）相比，铜的回收（二次生产）可节约 85% 的能源。此外，20 世纪以来被开采的铜中，有 2/3 沿用至今，且大部分用于电气设备。2010 年，仅再生铜就满足了全球 35% 的铜需求。当今社会，人口增长、产品创新以及经济发展等因素导致铜需求不断增加，而大部分铜产品使用寿命较长，这就需要将铜的开采与回收利用有效结合起来，满足日益增长的铜需求。

2013 年，随着全球新建矿山逐步进入产能释放期以及旧矿升级改造投产，铜矿供应进入高峰期，增速明显增加并超过精铜产出增速。南美洲、非洲和亚洲

将是铜矿产能增加的主要地区，亚洲地区主要增长国家为伊朗、中国、蒙古等国。未来几年，全球精铜冶炼产能仍将显著增加，平均年增速处于近二十年来最高水平，将达到 4% 左右，2016 年全球冶炼产能将达到 2 290 万 t/a。其中，亚洲仍然是最主要的扩产地区，在全球冶炼产能中的占比达到 50% 左右。亚洲地区的产能增长主要是来自于中国冶炼产能的增长。

2. 铟

近年来，随着高新技术的迅猛发展，铟广泛应用于高科技领域，应用范围不断拓宽，消耗量日益增加。而铟无独立矿床，仅伴生于锌、铅、锡等矿物中，属不可再生资源。我国是世界最大的铟生产国，占全球供应量的 80%。近几年铟的回收利用速度逐渐增加，再生铟占铟供应市场的 80%，可以回收铟的消费品种类包括计算机、电子设备、电视中的平板显示器和太阳电池中的含铟半导体材料等废料。日本对铟的消耗量已占全球总需求的 60%，对铟的回收率尽管达到 70%，但仍有 27% 被废弃，而直接用于电路的更是不足 3%。假设铟的消耗量中有一半使用替代材料，到 2018 年前后纯粹的铟资源也将枯竭，即使对整个储量来说，最迟也就是 2025 年。因此，研究和开发从工业料中回收铟，改进现有生产工艺提高铟的回收率，提高铟资源的利用率迫在眉睫。目前产需矛盾日趋严重的形势将合理利用铟资源，深入开展铟的应用研究提上日程。今后需加强对高效、高选择性、低损耗的萃取剂以及液膜分离、离子交换等高新技术的研究开发；进一步加强对铟资源的保护，有步骤、有计划地开采，取缔技术水平不高、资源浪费大、环境破坏程度高的企业；加强对工业废料中分离回收铟技术等研究项目的扶持，加快金属铟下游产品的研发及产业化步伐。

3. 镓

目前市场供应的金属镓产品主要有粗镓、高纯镓及化合物。粗镓可分为两种：原生镓和再生镓。再生镓主要从生产砷化镓等半导体材料过程中及废旧电器拆解过程中产生的废料中回收；原生镓 90% 来源于氧化铝生产行业。我国金属镓回收能力较小，所以对金属镓的需求全部依靠原生镓支撑，这也将促进我国市场对原生镓需求量的大幅增长。由于金属镓的某些物理化学性质同铝、铁、锌等相似，常与铝、铁、锌、锗等金属矿物相伴而生，因而镓主要是从冶炼这些金属的副产物中回收和提取。近年来，从不同原料中提取金属镓的研究发展较快，一些方法已得到工业应用，经济效益和社会效益均很显著。矿床中镓的品位普遍很低，提取比较困难，而国内很多企业把含镓的物料丢弃，造成大量镓资源的浪费，因此

对含镓原料进行合理的开发利用，有效利用镓资源，对促进我国镓化合物半导体材料及其器件产业的发展具有重要意义。

4. 硒

世界上的硒主要从铜电解的阳极泥中提取，小部分从生产硫酸或纸浆的烟气中的尘泥或淋洗的泥渣中获得。我国对赋存在硅岩建造中的硒资源还未加以利用，在石煤作燃料时也未综合回收。然而，硅岩建造中的共（伴）生硒矿资源和沉积型矿产在我国有较好的成矿条件和成矿远景，尤其是在许多沉积矿床（如 Ni-Mo 矿床、V-Ag 矿床、Au-Cu-U 矿床、煤等）中，硒均具有综合利用的价值，有些矿床中硒甚至达到了独立硒矿床所要求的工业品位。

5. 碲

由于地壳中碲几乎没有单一且可回收的矿物，而是以碲化物的形式浸染在一些重金属（主要是铜、金和银）矿物中。因此，工业上以冶金工业的副产品形式来回收碲，主要来自硫化铋矿石。虽然，冶炼钼、铀和铅矿石所产生的烟尘和烟气及铅提炼撇渣中也能回收碲，但从铜阳极泥中的回收量超过全球碲供应量的 60%。

随着全球铜产量的增加和碲回收率的提高，碲的产量增长速度将大大提高。若铜电解产生的副产品中 80% 的碲被回收，则 2014 年从铜电解副产品中回收的碲产量可达 1 059t，2020 年将达到 1 295t，将大大高于目前碲的产量。

6. 锂

锂是密度最小的金属，在全世界范围的不同矿体中蕴藏有足够数量的锂资源。目前，最具生产加工优势的资源并不是矿山的锂矿物，而是来自适度浓缩的海水或盐湖中的含锂盐类。废锂电池和蓄电池是当前最主要的锂再生原料。再生利用锂离子电池（LiBs）的整套系列虽已建立，但所用的专业设备能力偏小，再生回收的锂资源数量也非常有限（很少）。然而，各国科技工作者正在开发新的再生回收工艺，希望不仅能回收可再生利用制品中各种形态的锂，还能回收其中的钴和镍等有价金属。

7. 镍

全球镍金属储量达 8 000 万 t，基础储量约 1.5 亿 t。全球镍资源主要分布在环太平洋地区的澳大利亚、新喀里多尼亚、印度尼西亚、菲律宾、巴西以及俄罗斯、古巴、南非、加拿大等。2005 年以来虽然我国镍矿产量也在增长，但幅度异常缓慢，远低于同期镍金属产量的增长幅度，至 2012 年国内镍矿对国内镍金属冶炼的自

给率保障水平已下降到 15.8%，国内镍矿已远不能满足国内镍金属生产的需要。考虑到每年我国还有大量的进口镍铁及电解镍，实际上国内矿对于我国的镍金属消费的保障程度已低于 10%。我国镍资源已形成高度依赖进口的局面。国内的主力镍矿生产基地金川矿区经过多年开发，产能已显著饱和，从金川集团在甘肃地区的资源储量来看，镍矿产能增长的潜力非常有限。其他地区镍资源的储量虽有一定的增长潜力，但短期内转化为矿产的能力也面临一定困难。总体来看，我国镍矿资源处于非常短缺的局面，依赖进口的格局在相当长的时期内将无法改变。行业专家预测，每年回收的含镍废料总量为 440 万～ 460 万 t，其中镍的含量将近 35 万 t，是镍总需求量的 1/4。我国镍供给由两个部分组成：一部分是新产镍精矿供应，占 72.9%；另一部分来自再生镍，占 27.1%，可见再生镍行业在我国发展还比较落后，但同时也说明其发展空间巨大。目前，国家再生镍行业发展方向是规模化、专业化和环保化。国内高温合金、电镀、电池、再生铜电解等行业废镍料年产量已达到 5 万 t 以上（以镍计），但是国内的废镍回收量却相对较小。

8. 稀土

我国稀土储量曾约占全球储量的 90%。从 1958 年开始，我国开采稀土资源，50 多年来，为其他国家供应了大量稀土资源，国内稀土储量急剧减少。特别是从 20 世纪 90 年代至今，我国稀土资源出口量增长 10 倍，占世界稀土资源出口总量的 90% 以上。作为不可再生的矿产资源，随着近年来稀土矿被大量开采，全球稀土储量越来越少；中国等稀土储量大国逐渐加强对于稀土资源和环境的保护，稀土开采和供应正在减少；逐渐攀升的稀土价格，也使得稀土下游生产成本大幅提升。除此之外，大量含有稀土元素的电子产品废物的出现也为稀土回收产业的发展提供了契机。在资源短缺、成本大幅提高和技术不断发展的大背景下，稀土回收产业在一些国家逐渐被重视起来。根据应用范围可知，用于荧光照明和计算机硬盘驱动器等的含有稀土元素的器件都是稀土再生的重要原材料，美国环保署提供的数据显示，2009 年有 25% 的已消费电子产品被回收并用来提取稀土，这其中的 38% 来自计算机废弃件，18% 来自电视废弃件，8% 来自移动电话废弃件，3% ～ 5% 来自荧光照明废弃件，这些占有比例较大的原材料是最容易获得可回收稀土的材料来源，因此增加这些终端产品的回收量，目前来看将是稀土再生行业发展的关键所在。稀土回收技术比较成熟的国家主要有日本、德国和法国，我国废旧稀土资源综合利用技术还存在稀土资源回收

分离过程复杂（包括焙烧、浸出分离、萃取分离）、二次污染、破碎分离设备较复杂及拆分困难、成本高等问题。由于稀土再生的整个工业流程很复杂，首先需要主要消费行业有资源环保意识，从而增加再生原材料的回收量，进而更好地促进稀土再生行业向前发展，只有这样，稀土再生行业才能够更为投入和广泛地对其再生工艺进行研究，逐渐促使行业成熟发展，形成工艺尖端、循环稳定的稀土再生工业体系。

9. 天然石墨

虽然我国是世界石墨资源大国，但是天然石墨资源不可再生。1998 年以来，我国石墨生产量一直排名第一，但仍然无法完全满足自身对原料石墨的需求，从发达国家（如法国、日本、英国）进口天然鳞片石墨，价格却远高于自己的出口价格。我国石墨资源的利用还处于初级提纯、初加工阶段，对石墨保护性开采、深度开发利用至关重要。

10. 萤石

我国的伴共生型萤石矿综合利用水平还很低，而且，我国萤石资源贫矿多、富矿少，单一型萤石矿的平均萤石品位 35% ～ 40%，而品位大于 65%、可直接作为冶金级块矿的富矿则储量不多。尽管我国萤石资源储量丰富，但一直以来，我国对萤石资源的保护与使用却未引起应有重视，由于过度开采、过量出口，我国萤石储量静态可采年限不足 8 年，而世界萤石储量静态可采年限是 41 年。更为严重的是，由于萤石资源的竞相出口，造成战略物资的大量流失。

11. 芒硝

中国与世界芒硝储量区域化分布较为集中，四川的储量又占全国总量的 45.66%，占西部地区的 70%。按现有生产规模，可持续开采 300 年以上。

12. 氢

在地球上和地球大气中只存在极稀少的游离状态氢。在地壳里，如果按质量计算，氢只占总质量的 1%；而如果按原子百分数计算，则占 17%。氢在自然界中分布很广，水便是氢的“仓库”——氢在水中的质量分数为 11%；泥土中约有 1.5% 的氢；石油、天然气、动植物体也含氢；氢气约占空气总体积的 5×10^{-7}。在整个宇宙中，按原子百分数来说，氢却是最多的元素。据研究，在太阳的大气中，按原子百分数计算，氢占 81.75%。在宇宙空间中，氢原子的数目约是其他所有元素原子总和的 100 倍。

第 5 章　我国新能源材料领域发展的风险分析

近年来我国新能源材料产业取得了令人瞩目的成就，对于促进能源结构调整、缓解环境资源危机、促进国家经济与社会可持续发展起到了积极的作用。但与此同时，也存在投资大、成本高、技术不成熟、政策措施不到位、经验不足等诸多方面的问题。另外，新能源材料产业的发展在技术、经济、市场、管理体制、政策、资源环境等方面都存在一定的风险。

5.1　新能源材料科技与产业发展方向的选择

5.1.1　技术成熟度

技术成熟度是指单项技术或技术系统在研发过程所达到的一般性可用程度。新能源材料科技与产业的发展可分为研发、示范、推广和产业化四个阶段。一般来说，产业发展越成熟，技术商业化程度越高，则投资面临的技术成熟度风险越小。新能源产业技术在国内外发展阶段不同，其技术成熟度存在一定差异。

太阳电池材料主要有单晶硅、多晶硅、非晶硅薄膜、铜铟硒薄膜、碲化镉薄膜、砷化镓薄膜等。按照对太阳电池材料的要求，硅、砷化镓等是理想的电池材料，而碲化镉由于镉是有毒元素，其应用受到一定限制。再从原料资源、生产工艺、性能稳定性和技术成熟度等方面综合考虑，硅是最适合、最理想的太阳电池材料。由于薄膜电池被认为是未来最有可能大幅度降低光伏技术成本的出路，因此成为太阳电池研发的重点方向和主流，在技术上快速发展，并逐步向商业化过渡，多晶硅薄膜电池在 20 世纪 90 年代中后期开始成为薄膜电池的研究热点。目前，占太阳电池材料主导市场的是单晶硅和多晶硅。将来，多晶硅薄膜和非晶硅薄膜材料会逐步占领市场，并有可能最终取代晶硅材料的主导地位。近年来，随着材料科学的发展，不断有新材料、新工艺出现，如近期出现的有机－无机杂化钙钛矿材料，因其优异的光电性能而受到了极大的关注。

风力发电装置主要的材料应用是叶片、机舱。其中，叶片是风力发电装置最关键、最核心的部分，叶片的设计和采用的材料决定风力发电装置的性能和功率，也决定风力发电机组的成本。叶片占风力发电整个装置成本的 15% ～ 20%，制造叶片的材料工艺对成本存在决定性影响。因此，材料的选择、制备工艺优化对

叶片十分重要。根据叶片长度而选用不同的复合材料和核心材料，目前最普遍采用的是玻璃纤维增强树脂材料，例如玻璃纤维增强聚酯树脂、玻璃纤维增强环氧树脂，局部采用玻纤或碳纤增强环氧树脂作为主承力结构。环氧树脂因其具有高性能，一直是叶片树脂材料中的主要选择对象，但其成本较高；聚酯树脂则因商品化程度较高而占据较大市场；乙烯基树脂目前市场有限，但由于其良好的性能和低于环氧树脂的价格，未来将会有所增长。

锂离子电池的电化学性能主要取决于所用电极材料和电解质材料的结构和性能，尤其是电极材料的选择和质量直接决定着锂离子电池的性能和价格，因此，廉价、高性能的正负极材料开发及适当的电解质选用一直是锂离子电池研究的重点。近年来，具有容量大、价格低、无环境污染、使用安全等优点的新型电极材料及电解质材料不断开发出来，促进了锂离子电池的长足发展。聚合物锂离子电池材料是目前锂离子电池的一个开发热点。日本是研究锂离子电池材料最早的国家，其锂离子电池产品一直处于世界先进水平，日本化学、三菱化学、旭化成工业等日本公司占据了全球的主要市场。近年来，中国、韩国的锂离子电池研发及产业也得到很快的发展。全球锂离子电池产业基本形成了中、日、韩三分天下的格局。当前，锂离子电池正极材料的研究主要集中于钴酸锂、镍酸锂等电极材料。同时，一些新型的正极材料（如 Li-Mn-O 系材料、导电高聚物）的兴起也为锂离子电池正极材料的发展注入了新的活力，寻找开发具有高电压、高比容量和良好循环性能的锂离子电池正极材料新体系是该领域的重要研究内容。负极材料主要有碳材料、锂金属合金、金属氧化物、金属氮化物、纳米硅等，其中碳材料是目前商业应用的主要负极材料，而锂金属合金、纳米硅已成为研究热点。对于电解质材料，目前锂离子电池主要用液态电解质，其溶剂为无水有机物，如 EC、PC、DMCA、DEC，多数采用混合溶剂，如 EC-DMC 和 PC-DMC 等，$LiPF_6$ 是应用最为普遍的电导盐。商用锂离子电池所用的电解液大部分是采用 $LiPF_6$ 的 EC-DMC，它具有较高的离子电导率与较好的电化学稳定性。而固体聚合物电解质具有良好的柔韧性、成膜性、稳定性和低成本等特点，成为锂离子电池研究的一个热点。

就现代生物质能材料而言，我国燃料乙醇生产技术基本成熟，进入产业化初期阶段。但是生物燃料的生产技术有一定的原料适应性，从长期看，以粮食和经济作物为原料的燃料乙醇生产受到规模限制，具有不可持续性，而非粮燃料乙醇的发展受到技术瓶颈的制约。以纤维素作为原料的燃料乙醇将是未来的发展方向，

虽然已取得阶段性成果，但纤维素燃料乙醇还处于研发、示范阶段。另外，我国生物柴油还处于技术示范和推广生产阶段，虽然近几年以油料作物为原料的生物柴油项目竞相上马，但产业化程度仍然落后于燃料乙醇。

从根本上讲，大部分的可再生能源其实都是太阳能的储存。太阳能一般是指太阳光的辐射能量，而广义的太阳能则应该包含地球上许多能量的来源，如风能、化学能、水的势能等等。利用太阳能的方式方法主要有：光伏技术、光热（发电）技术、太阳能海水淡化技术等。

生物质能是太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量形式。依据来源的不同，可以将适合于能源利用的生物质分为林业资源、农业资源、生活污水和工业有机废水、城市固体废物和畜禽粪便等五大类。据统计，仅我国农作物秸秆的年总产量就在 5.8 亿 t 以上，其中作为工业原料、饲料和直接还田的约占一半，生活用燃料约占一半。全国已营造薪炭林 400 万 hm^2。薪炭林和能够供给薪柴的树种，如果合理采伐，每年约可提供 1.1 亿 t 薪柴。此外，动物粪便等其他生物质能的资源量也十分可观。但目前的使用方式很不合理，每年约有相当 2.5 亿 t 标准煤的秸秆和薪柴被低效率、低功能的燃烧方式作为炊事燃料消耗掉，用于制取沼气的只有 200 万 t 秸秆，仅占秸秆总产量的 0.4%，而用其他技术加以利用的几近于零。可见，生物质能资源量十分可观。

5.1.2 发展潜力

新能源材料是孕育新技术、新产品、新装备的“摇篮”，而新能源材料产业的发展对我国成为世界制造强国至关重要，它不仅被国家列为战略性新兴产业，而且是其他战略性新兴产业发展的基石、支撑和保障，更是推动技术创新的革命性力量。近年来，我国新能源发展吸引的投资约占世界新能源总投资的 1/5。

当前，绿色电池材料研究的热点和前沿技术包括高能储氢材料、聚合物电池材料、磷酸铁锂正极材料等。燃料电池材料领域研究的热点和前沿技术包括中温固体氧化物燃料电池，电解质材料等。太阳电池材料领域研究的热点和前沿技术包括晶体硅太阳电池材料、非晶硅薄膜电池材料、化合物薄膜电池材料和染料敏化电池材料等。

在我国，防污治霾问题日益凸显，促使人们不得不优先考虑提高能源生产效率、减少污染的方案，其中，较为有效的措施之一是逐步实现洁净煤燃烧。为了提高燃烧效率、热效，增加机动性，要发展超临界蒸汽发电机组、整体煤气化联合循环技术和大功率工业燃气轮机组。这些对材料的要求都十分苛刻，需要耐热、

耐蚀、抗磨蚀、抗冲刷的合金钢及低成本催化剂，高质量的合金钢及高温合金材料和涂层，工程陶瓷等材料，以满足高温、高强、抗蠕变、抗疲劳、耐蚀和长期工作的要求。此外，磁流体发电需要高性能的通道材料。未来的清洁能源，包括氢能、太阳能、风能、核聚变能等，在利用中也存在较多的材料问题。其中氢能的利用需要无机分离催化膜、储氢材料（储氢合金、碳纳米管等）；燃料电池需要质子交换膜、高温氧化物电极等材料；利用化学能的二次电池需要氢镍电池、锂离子电池正负极材料及快速充电系统等；太阳电池需要多晶硅、多结非晶硅及其他高效、长寿、廉价的太阳能光伏转换材料等；风力发电机组用大型风力发电机叶片，要求有足够强度和抗疲劳性能的材料，如玻璃钢、碳纤维增强塑料、增强木材等；核能发电中快中子增殖堆涉及液体钠的腐蚀等材料问题，核聚变装置需要耐中子辐射、耐高温和抗氢脆的材料；生物质能需要无机分离催化膜等等。在节能方面也涉及一些材料问题，如智能建筑中采用的具有保温、隔热性能的墙体材料及双层中空低辐射玻璃等，LED 节能灯中采用的半导体材料，高效电力系统中采用的超导材料及技术等。

以新能源汽车为例，要真正实现产业化和规模化，关键是能否在电力电池的能量密度、充放电次数、安全性等方面取得重大突破，归根结底还是取决于电池正/负极材料、电解液和隔膜的性能是否有大的提升，能否发现一种新的高性能储能材料。事实上，绿色二次电池的研究开发一直是国际上一系列重大科技发展计划的热点之一。基于新材料和新技术的高能量密度、无污染、可循环使用的绿色电池新体系不断涌现并迅速发展成新一代便携式电子产品的支持电源和电动车、混合动力车的动力电源，预计到 2015 年绿色动力电池市场将超过 300 亿美元。

5.2 新能源材料发展的风险

5.2.1 政策稳定性风险

政策风险对新能源产业投资的影响不可忽视，这是产业发展阶段和产业特征决定的。而新能源产业投资可能面临的政策风险主要来源于两个方面：一方面，新能源产业属于新兴产业，产业的兴起和发展离不开政策的引导和推动，产业扶持政策的完善程度将影响投资风险；另一方面，产业的发展也离不开政府的监督和规范，缺乏行业准入标准、产品质量标准等会严重制约产业的进一步发展。所以，完善的行业标准体系将是新能源产业健康有序发展的保障。

首先是产业政策，主要指国家和地区对新能源产业的政策性倾斜和鼓励，

如产业发展规划、税收优惠、财政补贴、强制上网等扶持政策。从国际新能源发展历程看，产业扶持政策是影响新能源产业发展的主导因素，所以产业政策对政策风险影响较大。目前，大多数新能源产业离开政策扶持是无法盈利甚至难以维系的。

在太阳能产业中，我国政府对光伏产业的支持力度最大。除了适用于所有可再生能源的《可再生能源法》《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》等外，还出台了针对光伏产业的政策，如《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》《关于实施金太阳示范工程的通知》等。此外，各地方政府积极支持光伏产业发展，推出了一系列办法措施。但是政策的连续性、系统化较差，可实施性有待提高，而作为光伏产业发展最重要支持手段的上网电价法也迟迟没有出台。

相比于光伏产业，国家对光热产业的支持力度较小。针对光热产业的政策如《推进全国太阳能热利用工作实施方案》，但为数不多。

我国从支持风电设备国产化、风电全额上网、特许权招标、强制风险发电目标、风电价格分摊和补偿以及税收财政支持几个方面支持风电产业的发展。实施的风电价格政策主要有固定电价、电量补助及税收优惠。但是，相比于国外，我国风电扶持政策缺少灵活性和主动性。

此外，由于风电和光伏发电存在发电与用电在地域空间上不匹配问题，以及发电具有间歇性的特点，为不影响电力系统稳定运行需要电网进行匹配才能接入。风电及光伏发电产业的发展与电网的规划建设及项目核准不协调、不配套，也使得风电和光伏发电难以并网，面临市场消纳的难题。目前，新能源开发政策有重开发、轻输送和使用的特点，很多政策针对发电企业，而对电网公司补贴太少，不能弥补其为配合新能源发电而进行的电网投资，影响了电网公司配合新能源发电上网的积极性。

生物柴油方面，政府已出台了一些政策措施，为生物柴油进入市场、为金融机构提供有财政贴息的贷款等提供了支持和法律保障，但国内缺乏针对生物柴油的专项政策，生物柴油产业并未得到足够的国家财税政策支持，部分出台的政策也尚未落实。国内生产生物柴油可享受增值税 100% 先征后返的优惠政策，但由于生物柴油要缴纳消费税，推高了生产成本，所以现有的财税政策并不能明显提高生物柴油价格的竞争力。与燃料乙醇企业相比，国家对生物柴油企业还没有具体的财政补贴。

我国针对垃圾发电的政策可以分为产业结构、投资和税费几个方面，相对完

整而且较为具体。主要优惠政策有发电全部收购、免收增值税、减免所得税、服务费等，但是政策的实施缺少细则，也缺乏足够的政策保障。此外，对垃圾分类缺乏长远规划，垃圾分类设施缺乏，回收体系不完整。

5.2.2 资源可持续性风险

资源风险主要指资源开发项目，如金属与非金属矿、石油、天然气等矿产资源的储量、品位、可采储量、开拓工程量及采选方式等与原预测结果发生较大偏离，导致项目开采成本增高，产量降低或者开采期缩短的可能性。新能源材料产业的原材料资源来源广泛，涉及金属、非金属、陶瓷、高分子、半导体、复合材料等各个领域。总体上看，我国的自然资源总量大、种类多，但人均资源占有量少、开发难度大，同时，开发利用不尽合理、科学，浪费、损失严重，给新能源材料产业的发展造成了一定程度的资源可持续性风险。为此，要依法整顿和规范资源开发秩序，加大依法行政力度；要大力发展精深加工，拉长产业链，提高产品附加值和市场竞争力；坚持开发和节约并举，把节约放在首位。

5.2.3 市场风险

市场风险是指由于成本、产品需求等市场因素的波动导致赢得市场竞争优势的不确定性。产品的供需状况、市场竞争、原料的供给风险等是影响产业市场风险的重要方面。从发达国家新能源发展状况看，新能源主流能源地位的趋势越来越明显，我国新能源产业整体虽然处于起步阶段，但发展速度快，发展潜力大，具有较强的市场成长能力，但是不同新能源产业面临不同的产品供求风险。

原料供给风险。主要是指由于原料价格上涨或原料供应得不到保障所带来的风险，原料短缺或价格上涨会导致企业开工率不足或影响企业盈利能力。原料供给问题一般是指产业上游产品供应量和价格波动对下游企业产生的影响。例如，用于制备太阳电池的多晶硅，其供给量和价格的波动严重影响下游硅片及电池生产行业。由于我国需要从国外进口大量多晶硅原料，致使原料价格受国外市场制约，能否获得稳定的原料供应成为众多硅片、太阳电池及组件厂商关心的核心问题。再如现代生物质能产业，生物质能的原料一般为油料作物或其他农作物，关系到国家粮食安全，原料问题更加突出。原料成本高、来源有限一直是制约生物柴油产业发展的瓶颈。按照当前的技术，原料成本占总成本的 75% 左右，所以原料是决定生物柴油价格的主要因素。燃料乙醇产业面临同样的问题，若以玉米作为原料，原料成本就占生产总成本的 70% ～ 80%。

市场竞争性风险。竞争对手的状况对新项目的发展前景具有很大的影响。新

项目在产业群体中的地位，直接影响着企业的兴衰和发展。产业数量的多少与新项目企业的成长速度也有着很大的关系。市场同业企业众多，势必造成产品需求的市场份额竞争。从国际和国内市场看，同业竞争对手主要体现在国内电池材料企业与国际知名电池材料企业的竞争，以及国内同业企业的竞争上。以锂离子电池材料为例，由于锂电电池技术长期被日本垄断，我国和其他国家在此项目上一直发展较慢。2000 年以后，我国锂离子电池的产业化开始起步，并且势头很猛。目前，我国锂离子电池材料生产企业已近 50 多家，主要分布在以深圳为中心的广东沿海地区，以及江苏、浙江等经济发达地区。而我国锂电池材料生产能力和生产技术的提高也为我国争夺锂电池市场提供了有利条件，但要巩固和扩展市场还需要进一步提升研发和营销能力。锂离子正极材料在锂电池成本中占第一位，它直接影响了电池容量及使用寿命、平台等功能。所以，选择正极原材料是电池厂家最慎重的事。比利时五矿生产的正极材料最早进入我国市场，之后把厂址由加拿大迁往韩国后，市场占有率逐渐减少，这与国产正极材料的迅速崛起有关。现进口的正极原材料已慢慢缩减占有率。随着新型锂离子电池正极材料镍锰型化合物 $Li_{1-x-y}Co_xMn_yO_2$ 以及正尖石锰酸锂（$LiMn_2O_4$）的项目产业化，市场的比例将作进一步调整。但无论如何，进口的正极材料，如日本清美以及我国的台湾理科等都具有很强的综合竞争力，将会持续保有一部分市场份额。

管理风险包括战略风险、环境调查预测风险、决策风险、实施控制风险。

（1）战略风险　涉及市场开发策略、主要货种市场竞争策略、优质服务策略、价格策略、协作策略、科技开发策略、财务策略等。战略方向决定了公司一定时期内的发展方向，在进行投资前，必须明确新能源材料产业未来的发展方向，以及该项目在该区域甚至国际范围内未来的竞争地位目标等。新能源材料项目的未来发展战略对技术和设备投入有巨大影响，这种影响主要体现在设备的投入量和技术投入的结构上。

（2）环境调查预测风险　是指项目的环境调查不全面、不准确，从而导致预测错误而给项目带来的风险。项目寻址的地理位置（自然地理、经济地理、交通地理）往往决定了该项目在地区经济中的地位，对项目未来发展产生着持久、连续的影响；自然条件包含项目所在区域的环境等条件，决定了未来的发展和规模，时时影响着项目的生存和发展。

（3）决策风险　是指项目的决策者在做出与项目有关的决策时所犯错误给项目带来的损失。项目的规划与计划是项目正常实施的有力保障，如果管理层对

项目的规划或计划不周，同样可以给项目带来一定的风险。

（4）实施控制风险　突出表现在对项目开发的控制上。新能源材料项目产业化是一项复杂的系统工程，项目规模大、涉及面广、环节多、投入的资金大、占用时间长，项目实施处于动态运作状态，具体动作过程中的不确定因素多，融资管理、技术管理、施工管理极其复杂。

技术风险是指项目投资建设中所采用的技术的先进性、适用性和经济性所带来的风险，主要考虑技术能力、技术平台和技术生命周期三种重要的风险。技术能力风险是指项目组织没有合适的专家来成功选择合适的技术，结果通常是项目没有完成，或做出完全没有希望的且充满干扰和其他问题的项目。技术平台风险是指使用不合适的或者不完善的新技术风险，消极地规避最新技术风险又会产生机会风险。虽然设备技术进步会使现在机械设备的生产力相对下降，形成机械设备的无形磨损，进行新设备的投入会增加项目的动作成本，但如果始终不肯进行技术创新和新设备投入，就会造成技术落后，使产品丧失竞争力。因此，考虑技术面对的是生命周期的哪一部分是非常重要的，其关键在于使问题与适当的技术相配。

5.2.4　投融资风险

作为典型的战略性新兴产业，新能源材料产业项目在融资过程中有与一般产业项目不同的融资风险因素。一是前期的高投入、低收益带来的融资风险。由于在初始研发期需要大量资金投入，而收益水平又往往较低，所以投资者大多不愿意将资本投入这种较长时间才能有投资回报的新技术、新兴产业。同样，金融机构也不倾向于把资金借给偿债时间长和偿债能力不佳的企业，而大部分高新技术产业项目在初创期又无法进行股票融资。这样，产业项目、企业起步阶段资金需求压力大，融资能力又严重受限，其融资风险急剧上升。二是市场的不确定性带来的融资风险。新能源材料产业所运用的技术往往具有超前性和复杂性，虽然在投融资前期也进行了较为充分的市场调查，但是这种调查具有相当大的主观预期，加之当代科学技术飞速发展、市场急剧变化、技术发展和市场需求的波动性和不确定性，使该产业项目的持有企业具有相当大的投资风险，最终降低了资本所有者的投资或借贷意愿，增大了产业项目的融资风险。三是核心技术研发能力不足带来的融资风险。核心技术是产业项目产品核心竞争力的关键因素之一，它既直接决定了产业项目的市场占有能力和产品赢利能力，又影响企业长期可持续发展能力，还影响产品的销售利润在不同主体间的分配。如果核心技术受制于他人，

就会使投资者风险增加，降低投资意愿，因而增加了融资难度。目前我国的新能源材料产业所需的核心技术研发能力较之西方发达国家还有较大差距，不少高科技产品的核心技术还没有完全掌握，研发转化能力不足带来了明显的融资风险，自主创新能力更是亟待提高。

第 6 章　新能源材料行业准入基本条件

我国新能源材料产业开发区发展主要依托矿产资源、资金实力、技术与人才、区位及市场等，其中资源和技术为关键依托要素。有关数据表明，我国中西部新能源材料产业基地主要依托资源优势，而东部地区则主要依靠市场、技术与人才等要素。各地的经济开发区、高新技术园区和产业基地为新能源材料产业集群的持续健康发展提供了有力保障。各区域新能源材料产业的发展及分布各有优势、各有特色。长江三角洲是我国最大的制造业基地，在主导产业中一半是具有比较优势的材料行业，并且在材料产业中的产值占比达到 50% 以上，市场占有率则普遍高于全国市场份额的 20%。珠江三角洲新能源材料产品行业集中度高，出口创汇能力较强，外向型特点突出，科技创新活跃。京、津、冀、鲁地区是全国科技创新资源最为集中的地区，新能源材料产业发展迅猛，在全国具有极强竞争优势。新能源材料产业属于整个制造业的上游产业，面对的下游产业广阔，如能源、汽车、建筑、计算机、电子信息、航空航天、交通运输等。从我国经济发展情况看，高新技术产业正迎来一个前所未有的高速增长时代。新能源材料行业准入基本条件包括资金保障、资源供给保障、技术条件、管理团队技术人才以及市场渠道的开拓几个方面。

6.1　资金保障

6.1.1　新能源电池

镍氢电池是二次电池，属于国家重点发展清洁能源扶持范围，特别是目前全球镍氢电池利用最为广泛的混合动力汽车。我国镍金属资源和稀土资源丰富，全球镍氢电池 70% 以上在中国生产。2011 年，国内具有一定规模的镍氢电池生产企业为 194 家，其中员工数 3 000 人以上的只有 10 家，多数企业为小企业，生产工艺落后，资金力量薄弱，抗风险能力低。近年来，随着锂离子电池的兴起，

镍氢电池市场份额逐步被挤压，并且受原材料攀升影响，镍氢电池成本压力巨大。2011 年，镍氢电池行业原材料 —— 镍、稀土、合金粉的价格都日益攀升，镍氢电池的生产成本增长 11%，同时伴随着镍价格上涨以及汇率、通胀、人工成本的上升，国内大部分镍氢电池企业出现亏损。国外情况也不乐观。美国 Ovonic 公司产品占全世界电动车用镍氢电池的 95%，其在美国先进电池开发联合体的资助下开展电动车用镍氢电池的开发，但成本仍较高，目前镍氢电池的价格为 500 ～ 700 美元 /（kW • h）。

锂离子电池主要由正极材料、负极材料、电解液和电池隔膜四部分组成。正极材料是锂电池的核心，也是区别多种锂电池的依据，占锂电池成本 40% 以上；隔膜是我国在技术上急需突破的瓶颈，绝大多数依靠进口，在成本构成上仅次于正极材料，占 20% ～ 30%；负极材料和电解液市场较为成熟，成本所占比例 10% ～ 15%。当然，各种材料的制造技术要求不同，投资价值也不一样。其中，市场容量最大、附加值较高的是正极材料，已批量应用于锂电池的正极材料主要有钴酸锂、锰酸锂、镍酸锂、钴镍锰酸锂以及磷酸铁锂。其中磷酸铁锂材料最被看好，但又是当前用量最少的一种正极材料。隔膜是锂电材料中技术壁垒最高的一种高附加值材料，国内能生产隔膜的企业屈指可数，仅有星源科技、金辉高科两家技术相对成熟，市场供应严重不足，大部分依赖进口。隔膜一直受制于国外，导致价格居高不下，从而使锂电池制造成本很高，也影响到我国锂电池产业的发展。电解液是影响锂电池性能又一重要材料，基本实现国产化，只有少部分使用进口电解液。国内主要生产企业有国泰荣华、珠海赛维电子等十余家，年生产能力千吨级以上。电解液主要原材料为六氟磷酸锂，占成本的 50% 左右。

燃料电池是一种连续地将燃料和氧化剂的化学能直接转化成电能的化学电源，短期来看，燃料电池发电相比水电、核能和太阳能等其他新能源发电方法不具备优势，总体尚处于研发和小规模示范阶段，行业处于生命周期的初创阶段。其中具有代表性且应用最广泛的燃料电池为质子交换膜燃料电池（PEMFC），而影响该燃料电池发展最大的因素是成本问题。使用贵金属铂作为催化剂，昂贵的质子交换膜及石墨双极板加工成本等，导致 PEMFC 成本约为汽油、柴油发动机成本（50 美元/kW）的 10 ～ 20 倍。PEMFC 电池组的成本是 1 000 ～ 2 000 美元/kW，如果未来商业化，其成本必须降到 50 美元/kW。降低 PEMFC 电池组的成本，必须降低三个关键部件（电极、电解质膜和双极板）的成本。如何减少电极上贵金属铂的使用量一直是工业难题，近几十年来，膜电极上铂的负载量从

10mg/cm^2 降到了 0.02mg/cm^2。质子交换膜是 PEMFC 的核心部件，迄今最常用的质子交换膜仍然是美国杜邦公司的 Nafion 质子交换膜，国内装配 PEMFC 所用的质子交换膜主要依靠进口。Nafion 膜的价格在 600 美元/m^2 左右，相当于 120 美元/kW（单位电池电压为 0.65V）。为尽早实现燃料电池的商业化应用，降低质子交换膜的价格迫在眉睫。

主流的太阳电池主要包括单晶硅和多晶硅太阳电池，Ⅲ－Ⅴ族化合物半导体薄膜电池，有机薄膜电池等，其中单晶硅和多晶硅太阳电池占有市场 70% ～ 80% 份额。晶体硅太阳电池发电成本较高，仍要由政府提供大额的补贴支持。

6.1.2 可再生能源材料

国家《可再生能源中长期发展规划》中明确要充分利用水电、沼气、太阳能热利用和地热能等技术成熟、经济性好的可再生能源，加快推进风力发电、生物质发电、太阳能发电的产业化发展，逐步提高优质清洁可再生能源在能源结构中的比例，力争到 2020 年达到 15% 左右。而要实现可再生能源发展目标，建设资金是必要的保障条件。根据各种可再生能源的应用领域、建设规模、技术特点和发展状况，采取国家投资和社会多元化投资相结合的方式解决可再生能源开发利用的建设资金问题。从 2006 年到 2020 年，新增 1.9 亿 kW 水电装机，按平均每千瓦 7 000 元测算，需要总投资约 1.3 万亿元；新增 2 800 万 kW 生物质发电装机，按平均每千瓦 7 000 元测算，需要总投资约 2 000 亿元；新增约 2 900 万 kW 风电装机，按平均每千瓦 6 500 元测算，需要总投资约 1 900 亿元；新增 6 200 万户农村户用沼气，按户均投资 3 000 元测算，需要总投资约 1 900 亿元；新增太阳能发电约 173 万 kW，按每千瓦 75 000 元测算，需要总投资约 1 300 亿元。加上大中型沼气工程、太阳能热水器、地热、生物液体燃料生产和生物质固体成型燃料等，预计实现 2020 年规划任务将需总投资约 2 万亿元。

在市场需要与政府政策的双重激励下，新能源产业必将快速发展，这就进一步促进了新能源材料产业的发展。下面以新能源光伏行业最重要的原材料多晶硅产业为例，来分析多晶硅产业入行所需资金保障。多晶硅是跨化工、冶金、机械、电子等多学科、多领域的高新技术产品，是半导体、大规模集成电路和太阳能产业的重要基础原材料，具有投资规模大、科技含量高、产业链长等特点，经济效益和社会效益都十分显著。随着全球电子信息产业和光伏产业的迅猛发展，多晶硅市场一直供不应求。按照 2013 年实际出货量统计，美国汉姆洛克（Hemlock）、

德国瓦克 (Wacker)、韩国东方化学工业（OCI）、中国保利协鑫（GCL-Poly）四大巨头加起来占比超过 74%。

随着硅材料产业快速发展，硅材料生产企业的入行门槛也在不断提高，只有具有一定规模的企业才能生存和发展，通常认为临界规模是年产 6 000 万 in^2/a（$1in^2=6.45\times10^{-4}m^2$）。因为硅片工厂要有超净厂房、超纯气体、超纯水和超纯化学药品的处理和供应系统，需要先进的制造设备和完善的检测设备，这些都要高额投资，而且要有足够的资金用于开发研究，所以先进的硅材料工厂必须上规模，否则没有竞争力。国外许多小厂在竞争中纷纷倒闭也说明规模之重要，加大规模必须投入大量资金。建立一个年产 200 万片硅片生产线投资逾 2 亿美元，千吨的多晶硅厂需 1 亿～ 1.5 亿美元投资，建设一个经济规模以上的硅片工厂需 1 亿～ 2 亿美元投资。

6.2 资源供给保障

新能源的出现与发展，一方面是能源技术本身发展的结果，另一方面也是由于这些能源有可能解决传统化石资源与环境问题而受到支持与推动。新能源的大量应用必然涉及新材料所需原料的资源问题。例如，太阳电池若能部分地取代常规发电，所需的半导体材料要在百万吨以上，对一些元素而言（如镓、铟等）是无法满足的。因此，一方面尽量利用丰度高的元素，如硅等；另一方面实现薄膜化以减少材料的用量。又例如，燃料电池要使用铂作触媒，其取代或节约是大量应用中必须解决的课题。当新能源发展到一定规模时，还必须考虑废料中有价元素的回收工艺与循环使用。下面将从几种最具商业潜力的新能源材料的使用、储备以及发展情况对新能源材料的资源供给情况进行介绍。

6.2.1 电池材料

镍氢电池作为当今迅速发展起来的一种高能绿色充电电池，在笔记本电脑、便携式摄像机、数码相机及电动自行车等领域得到了广泛应用。为了促进镍氢电池性能的提升，对负极储氢材料的研究从未间断。储氢材料的发现（1970 年由 Van Vucht 首先发现 $LaNi_5$ 合金具有良好的可逆储氢性能）、发展及应用促进了氢能的开发利用。目前，镍氢电池（MH-Ni）的商业化是储氢材料研究成果最有经济价值的突破，储氢合金的主要来源是稀土，而我国的稀土资源占世界总储量的 70% 以上，发展镍氢电池具有得天独厚的优势。但我国储氢合金材料生产技术尚未成熟，因此近年来其产量并未明显提高，反而在稀土价格高起的 2011 年

后呈现明显下滑。2013 年我国稀土储氢合金产量为 15 600t，还不能满足我国高速发展的镍氢电池产业的需求。

锂离子电池具有电压高、能量高、循环性能好、自放电小、无记忆效应等优点。锂离子电池的性能主要取决于所用电池内部材料的结构和性能。这些电池内部材料包括正极材料、负极材料、电解质和隔膜等。其中正、负极材料的选择和质量直接决定锂离子电池的性能与价格。因此廉价、高性能的正、负极材料的研究一直是锂离子电池行业发展的重点。通常负极材料一般选用碳材料，目前碳材料的发展比较成熟，而新的负极材料的研究方向是非碳极材料（如钛酸锂）。而正极材料的开发已经成为制约锂离子电池性能进一步提高、价格进一步降低的重要因素。表 7-6-1 给出了锂离子电池材料情况，可以看出锂离子电池主要组成材料已基本实现国产化，当前材料的应用情况可以基本满足我国锂离子电池市场发展的需求。据 2013 年统计数据，世界已查明的锂资源储量为 3 950 万 t，我国锂资源储量巨大，主要分布在青海、西藏、四川等省（区），且上述三省占我国锂资源储量的 85.2%。用金属锂生产的锂电池可以长期使用，而且可以回收，它并不是一次性消耗品。按全球已查明的金属锂资源量的 60% 的采取率计算，可以存储约 2 844 亿 kW · h 的电能，这约相当于三峡大坝满负荷运行 3.6 年输送的电量，也相当于全北京市 2.8 年的用电量。

表 7-6-1　锂离子电池各部分材料情况

名称	正极	负极	隔膜	电解液
主流产品	氧化钴锂	碳极材料	聚乙烯	六氟磷酸锂
国内情况	已经实现完全国产化	已经实现完全国产化	80% 进口	部分实现国产化
发展方向	三元材料、磷酸铁锂	非碳极材料		

我国年日照时数大于 2 000h、辐射总量高于 580kJ/m^2 的太阳能资源丰富和较丰富的地区约占全国总面积的 2/3 以上，具有开发利用太阳能的良好条件。目前主流太阳电池依然是硅电池。我国是全球主要的金属硅产地。据统计，2013 年我国金属硅产量为 145 万 t，同比增长 28.3%，截至 2013 年年底，我国共有金属硅产能 380 万 t。但我国的晶体硅提纯技术以及多晶硅提纯技术都处于比较落后的阶段，生产设备以及原材料主要依靠进口。近年来，为了保障本国太阳电池的国际竞争力，出口太阳电池板所需核心原材料的日本、德国、瑞典等国家纷纷削减了对中国的供应量。为了摆脱受制于人的被动局面，保证我国太阳能产业顺利发展，实现晶体硅材料自主供应已成为产业界共识。统计数据显示，我国目前

在建和筹建的多晶硅项目总产能接近 9 万 t。除增加多晶硅产量外，我国也积极发展薄硅片技术，有关工厂正在开发 100 μm 硅片电池技术。另外，薄膜太阳电池在大幅降低成本和提高效率方面具有很好的发展前景，目前主要有多晶硅、非晶硅、微晶硅薄膜电池。此外，利用其他材料替代硅材料来制备化合物电池的技术也在不断取得进展，目前已经能够商业化的化合物电池主要有 GaAs 电池、CIGS 电池、CdTe 电池等。

6.2.2 风能

目前风电设备叶片基本采用玻璃纤维复合材料。玻璃纤维复合材料由环氧树脂基材和增强材料组合，加入固化剂改性材料所形成。环氧树脂基材有几个大类：缩水甘油醚类环氧树脂、缩水甘油酯类环氧树脂、缩水甘油胺类环氧树脂、线性脂肪族类环氧树脂和脂环族类环氧树脂。我国普遍生产双酚 A 型环氧树脂，属于缩水甘油醚类环氧树脂，占使用的环氧树脂 90% 以上。而耐候性、抗老化性好的环氧树脂，是氢化双酚 A 型环氧树脂、脂肪族环氧树脂等特殊环氧树脂品种，这些种类基材我国研究较少。根据上海玻璃研究院《关于我国风力发电叶片的几点思考》所述，“国内专为大型叶片开发的树脂几乎没有”。叶片制造企业目前情况下只能用进口树脂。根据美国能源部发布的研究报告，国际市场上环氧树脂的产量可能会对风力发电机组产生制约。随着机组越来越大，风轮叶片越来越重，长度不断增长，碳纤维增强复合材料用于叶片有突出优势。它的比重不到钢的 1/4，但抗拉强度却是钢的 7 ～ 9 倍，抗拉弹性模量为 23 000 ～ 43 000MPa，具有广阔的应用前景。国内碳纤维生产能力仅占世界高性能碳纤维总产量的 0.4% 左右，国内用量的 90% 以上靠进口。目前全球碳纤维产能前四名的厂商依次是日本 Toray、日本 Toho、美国 Zoltek 以及日本 Mitsubishi Rayon，分别占全球产能的 23.4%、17.1%、14.3% 和 10.3%。中国台湾的台塑公司也占有全球产能的 8%。大陆产能较大的企业是大连兴科碳纤维。

6.2.3 生物质能资源

我国生物质能资源量巨大。据统计，我国农作物秸秆的年总产量在 5.8 亿 t 以上，其中作为工业原料、饲料和直接还田的约占一半，生活用燃料约占一半。全国已营造薪炭林约 400 万 hm^2，如果合理采伐，每年约可提供 1.1 亿 t 薪柴。此外，动物粪便等其他生物质能的资源量也十分可观。但目前的使用方式不合理，每年约有相当于 2.5 亿 t 标准煤的秸秆和薪柴被低效利用，用于制取沼气的只有 200 万 t 秸秆，仅占秸秆总产量的 0.4%，而用其他技术加以利用的几近于零。

近年来，随着我国经济的高速发展，社会与经济可持续发展所面临的能源、环境、农业等问题日益凸显，而借鉴国外经验，推广使用乙醇汽油是国家着力缓解能源、环境、农业问题的一项战略性举措。目前世界上已有近 20 个国家推广使用乙醇汽油，推广使用乙醇汽油状况最好的国家是巴西和美国。我国燃料乙醇起步较晚，但发展迅速。“十五”期间，国家发改委先后建设了 4 套燃料乙醇生产装置，核准生产 102 万 t/a 燃料乙醇，即中粮生化能源（肇东）有限公司（10 万 t/a）、吉林乙醇（一期 30 万 t/a）、安徽丰原生化（32 万 t/a）、河南天冠（30 万 t/a），其中除河南天冠使用部分小麦、中粮肇东使用部分陈化水稻为原料生产燃烧乙醇外，其余全部使用玉米。

从上述情况来看，我国是世界主要基础材料生产国和消费国，但在新材料领域与世界发达国家还存在较大的技术差距，高端产品以进口为主。在当前我国转变经济发展方式，调整产业发展结构，大力发展战略性新兴产业的重要时期，大力推进新材料产业的发展是提升我国核心竞争力的重要任务之一。目前我国已初步形成了比较完整的新材料产业体系，涌现出一批在新材料的制备技术、工艺技术等领域领跑的企业和科研单位。以我国上市公司为例，根据新材料的应用领域分类，在电子信息、新能源、纳米等多个领域培育和形成了一批颇具影响力的上市公司。据《中国新材料产业发展报告》预测，未来我国新材料产业市场年增长率仍将保持在 20% 以上。但是，在国际产业布局中，我国新材料产业仍处于由低级向高级发展的阶段，产业布局尚不完善，还存在自主创新能力较差、科技成果转化和产业化发展滞后等问题。

6.3 技术条件

新能源材料是发展新能源的核心和基础，其核心技术和发展重点为：动力电池和储能电池相关材料的国产化，包括动力电池正、负极材料，特别是实现锂盐和隔膜国产化或者本地化，为二次电池产业发展提供基础；硅和高分子等太阳电池材料与器件；燃料电池的关键材料及器件；风能利用相关材料与技术；生物质的致密化技术等。

为了抢占新能源材料研发生产技术的制高点，世界各国均把大力研究和开发新能源材料作为重大战略。美国、日本、欧盟等主要发达国家和地区均相继出台了一系列新材料相关的发展计划。根据中科院发布的《中国至 2050 年先进材料科技发展路线图》，我国新材料产业的发展目标是瞄准实现进口替代，全面满足新能源产业需求，技术水平达到国际领先，实现低能耗循环发展。新能源材料产

业不大可能像电子信息、装备制造等产业可以通过产业转移实现突破和提升，必须更加注重自主创新，培育本土大公司和科研院所，走出属于自己的发展、创新道路。新能源材料的研发需要技术、市场、政策的配合和联动。大规模商业化应用以及政府制定政策的支持将会持续推动新能源材料的研发。

6.3.1 锂离子电池产业研发现状

在储能电池领域，最具商业前景并得到广泛应用的电池是锂离子电池。目前国内生产和研发锂离子电池的企业及研究机构主要有：苏州星恒电源有限公司、深圳比亚迪股份有限公司、河南环宇电源股份有限公司、天津力神电池股份有限公司以及中国科学院物理研究所、清华大学、北京工业大学、上海交通大学等。苏州星恒是联想投资有限公司、中科院物理研究所、成都地奥集团等联合发起设立的高新技术企业，中科院物理所近 15 年的技术储备，多年来在“863”、“973”等项目上的支持给星恒打下了坚实的技术基础。星恒在核心技术上始终与国际接轨，并已把多项国内外自主知识产权的技术专利应用于锂电池产品、生产工艺。天津力神电池股份有限公司是一家拥有自主知识产权核心技术，专业从事锂离子蓄电池技术研发、生产和经营的股份制高新技术企业。在产业化建设过程中，力神公司始终高度重视技术研发工作，不断增加研发投入，做到生产一代、研发一代、储备一代，并获准设立博士后科研工作站、国家级企业技术中心。

6.3.2 太阳电池产业研发现状

目前硅基太阳电池仍占市场主导地位，因此太阳电池硅材料的生产和研发成为太阳电池产业主要关注点。多晶硅是太阳能光伏产业的最基本原料。多晶硅生产多年来一直致力于提高纯度，综合利用降低成本。现今国内外比较成熟的多晶硅生产工艺主要以改良西门子法为主，产能占总产能的 75%。我国从事太阳能多晶硅材料生产和科研的单位有：徐州中能、洛阳中硅、江西赛维 LDK、保定天威英利、常州天合光能等十多家。国内铸造多晶硅生产企业近年来高速发展，江西赛维 LDK 是世界上最大的铸锭多晶硅和硅片生产企业；常州天合光能逐步建立起体制机制创新的光伏科学与技术实验室，成为高素质人才的培养基地和产学研相结合的重要平台。

6.3.3 风电产业研发现状

目前碳纤维材料被广泛应用于新能源行业，在风力发电产业的发展中起到了重要作用。在风力发电产业中，风机叶片是关键部件之一，也是风机中成本最高的部件。随着风机功率的增加，风叶尺寸也相应增加，对增强材料的强度和刚度

等性能提出了新的要求。减轻叶片的质量，又要满足强度与刚度要求，有效的办法是采用碳纤维增强。使用碳纤维材料后，叶片质量的降低和刚度的增加改善了叶片的空气动力学性能，减少对塔和轮轴的负载，从而使风机的输出功率更平滑更均衡，提高能量效率。

6.4 智囊团队、技术人才

新能源材料企业是典型的现代企业，企业间的竞争也异常激烈，为了维持一个现代企业的生存并不断抓住机遇谋求发展，越来越离不开管理和智囊团的参与、合作和支持。除此之外，新能源材料产业是高科技聚集型产业，对于技术人才和研发人员的需求也是非常迫切的。现代企业的生存和发展离不开科学的管理制度、高效前瞻性的信息获得以及大量新技术的应用。新能源材料产业的特殊性质决定了企业管理团队需要有材料专业背景甚至是该行业顶尖的专家。以河北英利集团公司为例，苗连生是英利绿色能源的创始人，现任董事长兼首席执行官，也是中国可再生能源学会光伏专业委员会常务理事、中国光伏电池产业协会副主席、河北高新技术产业协会理事和中国全国工商联新能源产业商会理事。他先后就读于北京经济管理职业学院和北京大学，并分别获得商业管理学学士学位和工商管理硕士学位。该公司首席技术官宋登元博士在澳大利亚和中国开展太阳电池、硅材料和半导体光伏器件研发工作已有 27 年，其中在澳大利亚新南威尔士大学 ARC 光电研发中心进行硅基太阳电池、多晶硅薄膜太阳电池和第三代太阳电池研发工作将近十年。在进入新南威尔士大学之前，宋博士曾担任河北大学教授，教学和研究领域涉及太阳电池、硅材料、光电器件和自动化工程，在各类科技期刊上共发表学术论文 150 多篇。

智囊团是指专门从事开发性研究的咨询研究机构。它将各学科的专家学者聚集起来，为企业发展提供满意方案或优化方案，是现代领导管理体制中的一个不可缺少的重要组成部分。其主要任务是提供咨询，为决策者献计献策、判断运筹，提出各种设计；反馈信息，对实施方案追踪调查研究，把运行结果反馈到决策者那里，便于纠偏；进行诊断，根据现状研究产生问题的原因，寻找解决问题的症结；预测未来，从不同的角度运用各种方法，提出各种预测方案供决策者选用。仍以河北英利集团为例，李宗炜现任英利绿色能源执行董事兼首席战略官，同时担任优酷网的独立董事兼审计委员会主席。在此之前，他供职于普华永道会计师事务所 11 年，先后担任审计经理和高级审计经理。2009 年李宗炜及其团队将“英利”品牌带入世界杯赛场，使得英利成为首家赞助 2010 南非和 2014 巴西两届足

球世界杯的中国企业，让英利成为一个真正的“国际品牌”。

企业核心竞争力越来越表现为对作为第一资本的人才的培育、拥有和运用能力。在人才培育及合作方面英利与荷兰能源研究中心、挪威材料与化学研究所、中国科学院电工研究所、华北电力大学等国内外顶级研发机构和高等院校开展广泛的技术合作和高端人才培养项目，设有博士后工作站和院士工作站，英利“光伏技术国际联合研究中心”被国家科技部认定为我国光伏领域第一家国家级国际联合研究中心。从国家级的光伏技术实验室到一线生产车间，英利有一个由博士、硕士、普通技术员、设备员和一线工人共 300 多人组成的技术团队。该团队自主研发的“熊猫”N 型高效太阳电池最高转换效率超过 21%，量产效率达 19.7%，是世界三大高效太阳电池之一。

从英利集团的发展历程可以明显看出企业管理团队、智囊团队和技术团队对于一个企业的生存和发展起着巨大的推动作用。管理团队要建立起科学规范的管理制度，并能保证这些规章制度能够有效地贯彻实施，从而形成企业特有的管理文化，保证企业健康发展。智囊团队的建设对企业发展来说同样至关重要，要根据当前市场状况对未来行业发展进行准确预测，及时调整企业发展方向，保持企业高速稳健发展。技术人员是企业生存和发展的基石，现代企业要想占领市场赢得竞争就需要大量自主研发和创新，并且能够依靠高素质的技术人员将新技术新材料迅速应用于企业生产，不断提升企业竞争实力和综合实力，依靠生产技术不断进步实现企业自我升级。

6.5 市场渠道开拓

国家《可再生能源中长期发展规划》中明确指出我国可再生能源发展的目标是：提高可再生能源在能源消费中的比重，解决偏远地区无电人口用电问题和农村生活燃料短缺问题，推行有机废弃物的能源化利用，推进可再生能源技术的产业化发展。加快发展水电、生物质能、风电和太阳能，大力推广太阳能和地热能在建筑中的规模化应用，降低煤炭在能源消费中的比重，2020 年以后，要使可再生能源技术具有明显的市场竞争力，使可再生能源成为重要能源。新能源行业快速发展带动了新能源材料产业的迅速发展，并将进一步推动新能源材料的研发和生产，从而开拓出新的应用市场。

在多种新能源材料市场开拓案例中，碳纤维材料比较具有代表性，这里以碳纤维材料为例分析新能源材料的渠道开拓。“十二五”期间，国家对包括碳纤维在内的高性能纤维产品在工业领域的应用发展进行了立项和重点部署，积极研

制高质量、高性能碳纤维产品，并不断拓展其在军用、航天、能源、环保、汽车、造船、桥梁、建筑等方面的应用。目前国内生产碳纤维材料的企业主要有江苏恒神新材料公司、中复神鹰碳纤维公司、威海拓展纤维公司等。其中中复神鹰碳纤维公司是首个具备国产化万吨碳纤维生产能力的企业，每年可产碳纤维原丝 3 000t，技术不断革新以及市场渠道拓展对中国台湾地区市场以及有着 50 多年碳纤维发展历程的日本市场形成了较大压力。除了生产碳纤维以外，公司还重视应用领域的拓展，从推动规模化产能最大程度转化为规模化的产量出发，在生产连续化过程中不断提高生产技术水平，继而提高产品质量，从而达到进一步拓宽碳纤维产品应用范畴的目标，同时也有利于降低碳纤维生产成本。另外，还尝试开拓碳纤维预浸料等下游产品市场。企业计划用 3 ～ 5 年的时间建成国内最大、完全国产化的万吨级碳纤维生产基地。2014 年中复神鹰公司携高性能碳纤维 SYT45、SYT49、SYT50 参加巴黎复合材料展会，收获了不少意向性订单。

新能源材料应用非常广泛，早已渗透到国民经济生活中的方方面面。我国新能源材料生产企业充分认识到技术进步对于企业发展和市场开拓的重要性，纷纷建立自己的研发中心，并不断寻求与科研院所的合作，不断提升产品质量和科技含量，积极参加国内外各种类型展销会，谋求从国内走向国际舞台之路。随着国家对于新能源材料研发投入的增加，新能源材料企业必将得到快速发展，不断掌握核心技术开发出新型材料，持续降低生产成本提升企业核心竞争力，逐渐走向国际市场。

第 7 章　新能源材料科技与产业发展战略指导

7.1　我国新能源材料科技与产业战略指导

7.1.1　我国新能源材料发展目标

2012 年 7 月 9 日，国务院印发了《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》。该《规划》指出，到 2020 年，要力争使战略性新兴产业成为国民经济和社会发展的重要推动力量，增加值占国内生产总值比重达到 15%，新能源、新材料、新能源汽车产业将成为国民经济先导产业。

作为未来能源替代以及可持续发展的方向，新能源在当前及未来相当长的一段时间内将持续快速发展。在《新材料产业“十二五”发展规划》中，新材料的

发展目标为总产值达到 2 万亿元，年均增长率超过 25%。重点新材料企业研发投入占销售收入比重达到 5%，建成一批新材料工程技术研发和公共服务平台，实现碳纤维、钛合金、耐蚀钢、先进储能材料、半导体材料、膜材料、丁基橡胶、聚碳酸酯等关键品种产业化、规模化。到 2020 年，建立起具备较强自主创新能力和可持续发展能力、产学研用紧密结合的新材料产业体系，并成为国民经济的先导产业，主要品种能够满足国民经济和国防建设的需要，部分新材料达到世界领先水平，材料工业升级换代取得显著成效，初步实现材料大国向材料强国的战略转变。如表 7-7-1 所示。

表 7-7-1 “十二五”新材料具体发展目标

项　目	具体发展目标
产业规模	总产值达到 2 万亿元，年均增长率超过 25%
创新能力	研发投入明显增加，重点新材料企业研发投入占销售收入比重达到 5%。建成一批新材料工程技术研发和公共服务平台
产业结构	打造 10 个创新能力强、具有核心竞争力、新材料销售收入超 150 亿元的综合性龙头企业，培育 20 个新材料销售收入超过 50 亿元的专业性骨干企业，建成若干主业突出、产业配套齐全、年产值超过 300 亿元的新材料产业基地和产业集群
保障能力	新材料产品综合保障能力提高到 70%，关键新材料保障能力达到 50%，实现碳纤维、钛合金、耐蚀钢、先进储能材料、半导体材料、膜材料、丁基橡胶、聚碳酸酯等关键品种产业化、规模化
材料换代	推广 30 个重点新材料品种，实施若干示范推广应用工程

2015 年 7 月 30 日，国家发改委高技术产业司颁布“十三五”国家战略性新兴产业发展研究课题招标公告通知。其中提到“十三五”期间国家战略性新兴产业发展的研究要点。

“‘十三五’期间战略性新兴产业发展环境及发展对策研究”要点：研究“十三五”期间国际、国内经济社会发展环境变化，科技和产业发展趋势、新特点。研究提出培育壮大战略性新兴产业的原则性思路。

“全球主要国家新兴产业发展现状、发展趋势和主要措施研究”要点：研究美、欧、日、韩及金砖国家的节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备、新能源、新材料、新能源汽车等战略性新兴产业重点领域发展现状、发展趋势，主要国家出台的有关规划、行动计划和措施，总结发达国家新兴产业发展规律、发展效果及值得借鉴的政策措施等。

“‘十三五’期间战略性新兴产业发展总体思路研究”要点：结合战略性新兴产业面临的发展环境和需要承担的重大任务，总结“十二五”国内外发展情况，以 2020 年战略性新兴产业增加值占国内生产总值比重达到 15%，有力支撑经济社会发展为目标，研究提出加快发展战略性新兴产业总体思路。

“战略性新兴产业政府宏观引导方式创新研究”要点：借鉴国内外经验，研究“十三五”期间如何更好地发挥市场配置资源的决定性作用，政府支持产业发展的方式如何由选择性向普惠性政策转变。同时，在特殊领域如涉及技术安全、战略安全的产业领域，政府如何加强管理，实现更好的调控。

“战略性新兴产业国际化发展研究”要点：研究我国战略性新兴产业如何更好利用全球创新资源，形成国际化研发体系和产业体系。研究我国战略性新兴产业发展如何融入“一带一路”等重大战略，引领先进产能“走出去”等。研究通过设立新兴产业国际化指数等方式，引导国际化发展。

“城市转型发展新兴产业研究”要点：结合北京、深圳、合肥等城市产业发展案例，研究战略性新兴产业发展优势城市如何结合实施创新驱动发展战略，形成全球领先水平的新兴产业创新策源地并支撑实施京津冀协同发展和长江经济带一体化发展战略。

7.1.2 我国新能源材料的变化趋势

1. 光伏材料

太阳电池是光伏产品的核心部分。太阳电池按材料分类可分为硅基太阳电池、化合物半导体太阳电池、有机半导体太阳电池，其中硅基太阳电池在市场上占主导地位，常见为晶硅太阳电池。全球前 20 大太阳能组件厂商中有 16 家都是供应基于常规太阳能级硅片的光伏组件。

总体上，全球以及中国的太阳电池产量呈缓慢上升的状态。光伏产业的发展不能停止在晶硅太阳电池的层面上，它需要技术的研发。太阳电池制备工艺、技术、设备、器件的研发对光伏发电效率有着重大的影响。图 7-7-1 中列出了太阳电池实验室研发进展情况。

由数据可以看出，四结或更多结聚光电池效率达到 44.7%，而三结聚光电池亦高达 44.4%，单晶硅和多晶硅聚光电池分别达到 27.6% 和 20.4%，薄膜太阳电池的最高效率是铜铟镓硒太阳电池（CIGS）的 23.3%，非晶硅太阳电池效率稳定达到 13.4%，染料敏化太阳电池效率达到 11.9%，而最近新研发出的钙钛矿太阳电池效率高达 20.1%（目前不稳定）。太阳能光伏制造和终端市场供应将分为以下三种

技术类型：使用常规太阳能级硅片的标准晶硅制造技术，使用高质量硅片的高效晶硅制造技术，使用类似平板显示行业中沉积工艺的薄膜面板技术。前两类主要以单晶硅和多晶硅为材料，第三类主要包括非晶硅、微晶硅、碲化镉、铜铟镓硒太阳电池，其他种类的太阳电池均在研发和中试阶段，其中碲化镉薄膜太阳电池含有重金属元素镉，它的生产和使用对环境会造成不利影响；铜铟镓硒太阳电池制作过程复杂，制作成本高，关键原料供应不足。因此，在未来一段时间内，硅材料在光伏产业仍然占据主导地位，其他材料则要在关键技术上进行突破，主要包括简化工艺、低成本封装、有毒材料控制、大规模高效产品、制备材料有效性等。

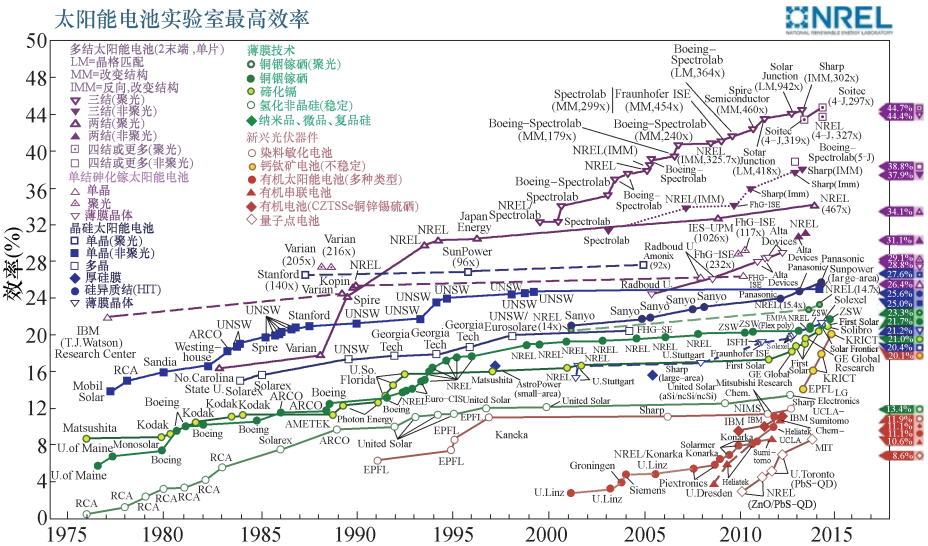


图 7-7-1　太阳电池实验室最高效率发展路线图

数据来源：NREL。

2. 大容量锂离子电池材料

新能源以及新能源汽车等战略性新兴产业等政策支持推动了锂离子电池产业的快速发展，2013 年行业总产值为 500 亿元。2014 年上半年，我国锂离子电池行业总产值接近 400 亿元，下半年国内锂离子电池及相关的关键材料产量也在稳定高增长。

目前锂离子电池材料的发展进入了新阶段。在所有原材料中，正极材料是锂电池中最关键的原材料，它直接决定了电池的安全性能和电池能否大型化，同时也是锂电池成本占比最高的材料，约占锂电池电芯材料成本的 1/3 左右。2013 年我国锂离子电池正极材料产量约 4.6 万 t，未来在动力电池需求的拉动下，锂离子

电池正极材料仍将有巨大增长潜力，预计至 2020 年我国动力电池用正极材料需求约 8 万 t，正极材料总需求约 16 万 t。如图 7-7-2 所示。隔膜是关键的内层组件之一，它的性能决定了电池的界面结构、内阻等，直接影响电池的容量、循环以及安全性能等特性，性能优异的隔膜对提高电池的综合性能具有重要的作用。目前我国在隔膜材料技术上相对落后，进口依赖度较高。在锂离子电池负极材料中，石墨类碳负极材料一直是其主要类型，主要包括改性天然石墨、石墨化中间相碳微球（MCMB）和低端人造石墨。由于天然石墨来源广泛、技术相对成熟、成本占比不高，目前占据越来越多的市场份额。锂电材料需求情况如图 7-7-3 所示。

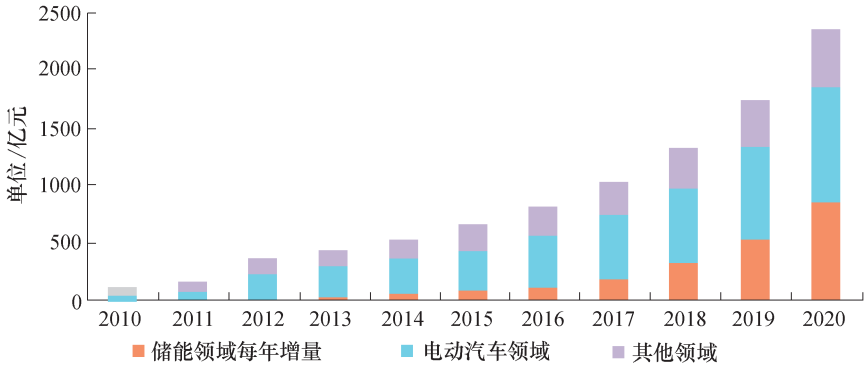


图 7-7-2　国内锂离子电池市场空间测算

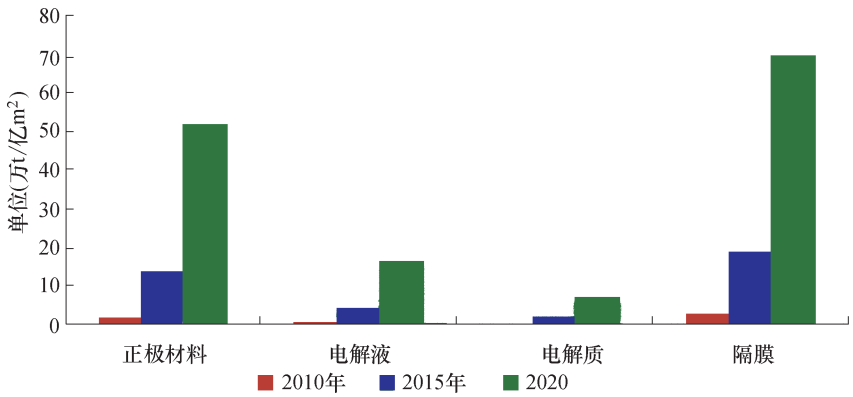


图 7-7-3　锂电材料需求增长情况

3. 风电材料

根据《“十二五”可再生能源发展规划》，我国风电并网目标要达到

200GW，而全球风能理事会预测 2020 年我国风电装机容量达到 250GW。风能发电中的关键材料是复合材料叶片。2007—2010 年，我国风电叶片交付量伴随国内风电装机容量高速增长。2010—2013 年，大量风电叶片企业涌入，风电市场出现许多非理性的经营以及市场行为，风电叶片产量过剩。而自 2014 年 6 月开始，受风电上网电价下调预期影响，各大风电投资商排定的 2014 年年度建设规模总量接近 25GW，国内风机叶片行业开始出现“短缺”状况。

4. 储能材料

当前，世界储能材料的技术发展相当迅速。无论在材料技术研发层面上还是在成果转化形成优势产业层面上，我国都有大量开拓性工作需要落实。目前先进的储能技术主要有镍氢电池、锂离子电池、燃料电池、液流电池、电化学电容器、金属—空气电池和超导储能等。镍氢电池现主要应用于混合电动车，其关键材料是负极储氢材料，其发展空间仍然取决于混合电动车的应用情况。镍氢电池和锂离子电池正朝着高能量密度、高功率密度以及高成本的方向发展。我国的燃料电池研究始于 1958 年，经过多年的发展，目前燃料电池的研究在于采用新型材料的研究，而超级电容器也逐渐应用在电动车的辅助能源。

7.1.3 我国新能源材料科技与产业的优势领域

随着政策对新能源材料产业的支持力度越来越大以及国际交流合作的深入，我国新能源材料产业逐步壮大，技术水平逐步提升。

1. 光伏材料

从产能、产量上看，我国已经是世界上最大的多晶硅生产国。伴随着建设工期，多晶硅生产技术的不断提高。企业通过新建、技改项目，实现了装备的升级更新以及工艺的优选优化，在提高产量和产品质量的同时降低了生产能耗和成本。我国多晶硅行业是规模经济型产业，在一定范围内，规模越大，成本越低。流化床制取多晶硅、物理冶金法等新工艺技术的研发也对降低成本、提高产品质量做出贡献。同时，国内环保减排受重视，多晶硅产业排放问题得到控制。

图 7-7-4 用来自 2012 年和 2013 年的数据，给出了一个更新的世界各国太阳能产业投资吸引力。横坐标为各国投资吸引力，纵坐标为光伏市场的投资吸引力。后者是根据标准计算的，如电力市场的大小和光伏成本竞争力（包括国家辐照水平、光伏生产可能性）等关键因素，与国家的政治以及商业环境无关。该图表明，中国无论国家投资吸引力还是光伏市场吸引力在全球都排在较前的位置，说明中国光伏市场拥有巨大的投资潜力。

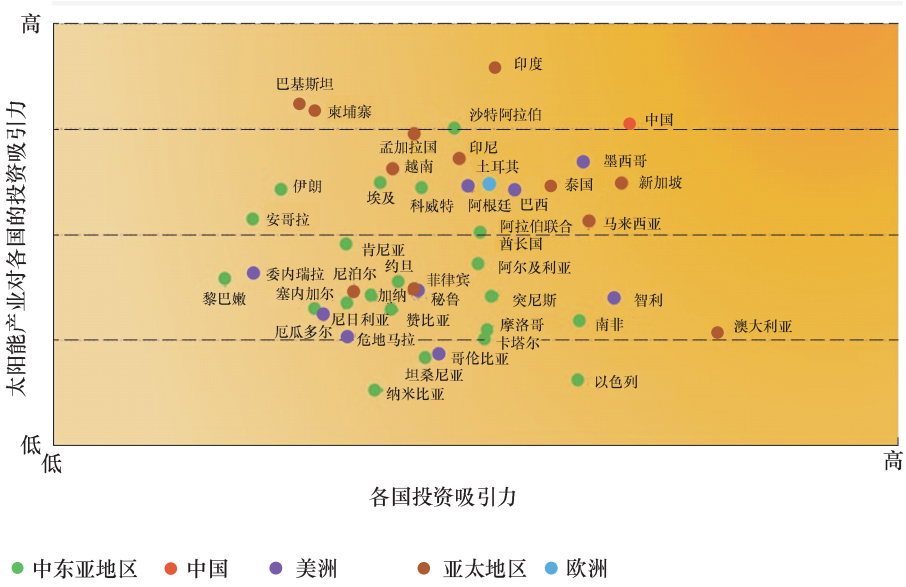


图 7-7-4　世界各国太阳能产业投资吸引力

数据来源：EPIA。

图 7-7-5 显示了 2011 年及 2014 年全球晶硅产业链分布，其中中国在各个环节基本占主要份额。2011 年，中国的各种光伏材料产量都相当大，但基本上以出口为主。经过 2012 年“双反”事件后，中国光伏材料产业受到重创，光伏市场持续低迷。经过政府政策的推动，产业结构的调整等，2014 年中国光伏市场升温，并在全球光伏产品终端环节占有主要份额。中国光伏材料市场产业结构趋于成熟。

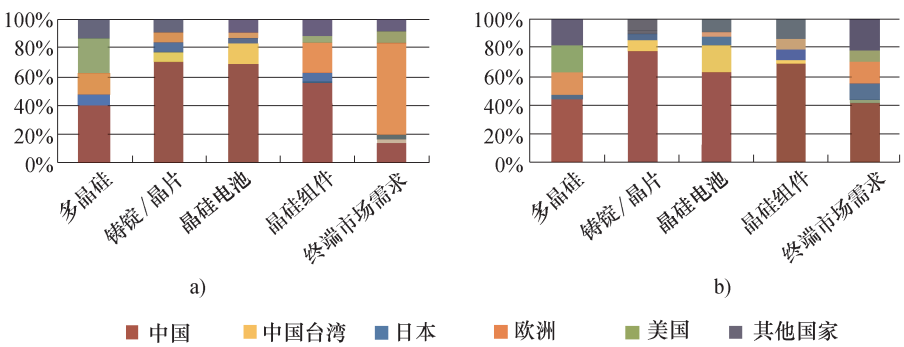


图 7-7-5　2011 年及 2014 年全球晶硅产业链分布

a）2011 年　b）2014 年

数据来源：solarbuzz。

2. 风电材料

根据世界风能协会统计报道，我国 2014 年上半年新增装机容量 7.1 GW，占世界风能装机容量的 41%。2015 年我国风电累计并网容量仍稳居世界第一，风电材料市场潜力巨大。

3. 大容量锂电池材料

我国是全球最大的锂电池生产制造基地之一。磷酸铁锂作为锂离子电池的正极材料，国内的产业化发展基本与国际同步。锂离子电池负极材料产业发展的核心是资源与技术，我国在锂电池负极材料具有巨大的资源优势。在国家大力发展新能源汽车以及纯电动车的方向明确、整合铅酸电池产业的大背景下，锂电池和相关上下游产业已经迎来新的发展机遇。锂电池的应用亦愈趋广泛，其应用更进一步辐射至电动汽车、电动自行车、储能等领域，各种锂电池材料面对着巨大的市场空间。

4. 储能材料

我国新能源产业的发展相当迅速，对储能产业和储能材料需求迫切。政府部门于 2009 年开始重点关注储能产业的发展，国家发改委、科技部、工信部委为储能产业设立了专项基金，在国家“863”“973”等科研项目中亦有体现。目前，我国先进储能材料产业具有以下优势：产品高度专业化、技术创新成果突出、国际合作交流密切。

7.1.4 我国新能源材料重点工程

1. 先进高分子材料

制定发布丁基橡胶等特种橡胶及专用助剂、聚酰胺等工程塑料及制品、电池隔膜、光学功能薄膜、特种分离膜及组件、环境友好型涂料以及功能性化学品等一批重点产品标准，完成测定方法、通用技术条件、应用规范等配套标准制修订。完成功能薄膜、特种橡胶等领域 65 项重点新材料标准制修订工作，提出 110 项重点标准研制计划。

2. 新型无机非金属材料

重点研制电光陶瓷、压电陶瓷、碳化硅陶瓷等先进陶瓷，微晶玻璃、高纯石英玻璃及专用原料，闪烁晶体、激光晶体等产品标准，加快材料杂质检测、试验方法等配套标准制修订步伐，强化配套标准研制。完成特种玻璃、氮化硅陶瓷材料等领域 50 项重点新材料标准制修订工作，提出 30 项重点标准研制计划，开展 5 项重点标准预研究。

3. 高性能复合材料

制定完善碳纤维、玄武岩纤维等高性能纤维标准，加快制定发布纤维增强复合材料相关标准，积极研制树脂基、陶瓷基复合材料制品标准，研究复合材料分类方法标准、性能测试标准、专用原料标准等配套标准。完成高端玻璃增强纤维等 10 项重点新材料标准制修订工作，提出 30 项重点标准研制计划，开展 10 项标准预研究。

4. 前沿新材料

及时开展前沿领域标准预研究工作，协调、优化关键技术指标，重点围绕纳米粉体材料、石墨烯、超导材料及原料、生物材料及制品、智能材料等产品，完成 5 项重点新材料标准研制工作，提出 10 项重点标准研制计划，开展 30 项标准预研究，紧密跟踪国际新材料技术标准发展趋势，提前做好标准布局。

结合新能源材料发展趋势及热点新材料，未来重点发展材料可能有纳米钙钛矿型材料、石墨烯、超导材料等，见表 7-7-2。

表 7-7-2　未来重点发展的材料

材料类别	优点	关键技术研究	主要研究机构（公司）
纳米钙钛矿型材料	具有高离子导电性、对氧析出和还原起催化作用等	光催化、传感器、太阳电池领域	埃普瑞、AlfaAesar 等
石墨烯	非同寻常的导电性能、极低的电阻率、极快的电子迁移速度、超出钢铁数十倍的强度和极好的透光性	光电显示、半导体、触摸屏、电子器件、储能电池、显示器、传感器、半导体、航天、军工、复合材料、生物医药等领域	Graphene Technologies、Angstron Materials、Graphene Square、常州第六元素、宁波墨西等
超导材料	超导状态下，材料零电阻、电流不损耗，材料在磁场中表现抗磁性等	高温超导技术、绿色新型传输磁悬技术、解决电力传输损耗和电子器件发热等	日本住友、德国 Bruker、中科院等

7.1.5　实现战略目标的方案

根据《新材料产业“十二五”发展规划》，实现战略目标需要做好政策引导和行业管理、健全投融资保障机制、完善技术标准规范、加强国际合作交流。其具体内容如下。

贯彻落实《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》要求，建立和完善新材料产业政策体系，加强新材料产业政策与科技、金融、财税、投资、贸易、土地、资源和环保等政策衔接配合。制定和完善行业准入条件，发布重点新材料产品指导目录，实施新材料产业重大工程。推进组建新材料产业协会。建立健全新材料产业统计监测体系，把握行业运行动态，及时发布相关信息，避免盲目发展与重复建设，引导和规范新材料产业有序发展。

加强政府、企业、科研院所和金融机构合作，逐步形成“政产学研金”支撑推动体系。制定和完善有利于新材料产业发展的风险投资扶持政策，鼓励和支持民间资本投资新材料产业，研究建立新材料产业投资基金，发展创业投资和股权投资基金，支持创新型和成长型新材料企业，加大对符合政策导向和市场前景的项目支持力度。鼓励金融机构创新符合新材料产业发展特点的信贷产品和服务，合理加大信贷支持力度，在国家开发银行等金融机构设立新材料产业开发专项贷款，积极支持符合新材料产业发展规划和政策的企业、项目和产业园区。支持符合条件的新材料企业上市融资、发行企业债券和公司债券。

瞄准国际先进水平，立足自主技术，健全新材料标准体系、技术规范、检测方法和认证机制。加快制定新材料产品标准，鼓励产学研用联合开发重要技术标准，积极参与新材料国际标准制定，加快国外先进标准向国内标准的转化。加强新材料品牌建设和知识产权保护，鼓励建立重要新材料专利联盟。加快建立新材料检测认证平台，加强产品质量监督，建立新材料产品质量安全保障机制。

鼓励企业充分利用国际创新资源，开展人才交流与国际培训，引进境外人才队伍、先进技术和管理经验，积极参与国际分工合作。鼓励境外企业和科研机构在我国设立新材料研发机构，支持符合条件的外商投资企业与国内新材料企业、科研院校合作申请国家科研项目。支持企业并购境外新材料企业和技术研发机构，参加国际技术联盟，申请国外专利，开拓国际市场，加快国际化经营。

7.2 我国新能源材料科技与产业的战略布局

7.2.1 新能源材料与上下游产业的协调发展模式

产业链向上游延伸一般使得产业链进入基础产业环节和技术研发环节，主要包括材料的开采、制备以及技术研发；产业链向下游拓展则进入市场拓展环节，

主要包括太阳电池、风机叶片、储能电池、新能源汽车等产品。产业链的实质就是不同产业的企业之间的关联，而这种产业关联的实质则是各产业中的企业之间的供给与需求的关系。上下游产业的协调发展，是新能源材料科技产业健康发展的重要保证。

现在，我国新能源材料产业普遍存在产业链不完整或上下游产业链无法对接问题。典型案例如下：

（1）2007—2010 年，我国风电叶片交付量伴随国内风电装机量高速增长，2010—2013 年，大量风电叶片企业“赶上末班车”。但由于风电机组市场不乐观，总产能已远远超过国内市场需求，从而造成风电设备产能过剩的局面。风电行业产业链上下不对接是制约风电产业化的主要因素。

（2）光伏产业链从上至下分别包括多晶体硅原材料制造、直拉单晶硅和铸锭多晶硅的生产、硅片切割、太阳电池制造、光伏组件封装和光伏系统安装应用等。2012 年全球光伏市场乏力，市场需求下滑，“双反”事件影响，使得太阳能光伏发电产业链末端发展严重不足，国内多晶硅产量、价格下滑，产业链中上游供应过剩，国内光伏市场低迷。

新能源材料上下游协调发展需要政府政策的推动，需要突破关键技术，拉长产业链，支持通过拉伸产品链进行合作，构建新材料产业发展联合体，形成上下游产品配套协调加工体系。

7.2.2 以政府引导和市场需求分布为基础的产业布局

特种金属功能材料要立足资源地和已有产业基地，促进资源综合利用，着力提高技术水平；高端金属结构材料要充分依托现有大中型企业生产装备，加快技术改造和产品升级换代，严格控制新布点项目；先进高分子材料应坚持集中布局、园区化发展，注重依托烯烃工业基地，围绕下游产业布局；新型无机非金属材料应在现有基础上适当向中西部地区倾斜；高性能复合材料原则上靠近市场布局，碳纤维等增强纤维在产业化和应用示范取得重大突破前原则上限制新建项目。

按照国家区域发展总体战略和主体功能区定位，立足现有材料工业基础，结合各地科技人才条件、市场需求、资源优势和环境承载能力，建设了以下重点新材料产业基地，如表 7-7-3 所示。

表 7-7-3 重点新材料产业基地

基础类别	重点新材料产业基地
01	稀土功能材料基地
	重点建设北京、内蒙古包头、江西赣州、四川凉山及乐山、福建龙岩、浙江宁波等稀土新材料产业基地
02	稀有金属材料基地
	重点建设陕西西安、云南昆明稀有金属材料综合产业基地，福建厦门、湖南株洲硬质合金材料基地。加快在中西部资源优势地区建设一批钼、钽、铌、铍、锆等特色稀有金属新材料产业基地
03	高品质特殊钢基地
	以上海、江苏江阴等为中心，重点建设华东高品质特殊钢综合生产基地。依托鞍山、大连等老工业基地，打造东北高品质特殊钢基地。在山西太原、湖北武汉、河南舞阳、天津等地建设若干专业化高品质特殊钢生产基地
04	新型轻合金材料基地
	重点建设陕西关中钛合金材料基地，重庆、山东龙口和吉林辽源新型铝合金材料基地，山西闻喜、宁夏石嘴山新型镁合金材料基地
05	特种橡胶基地
	重点建设北京、广东茂名、湖南岳阳、甘肃兰州、吉林、重庆等特种橡胶基地
06	工程塑料基地
	重点建设江苏苏东、上海、河南平顶山工程塑料生产基地及广东改性材料加工基地
07	高性能氟硅材料基地
	重点建设浙江、江苏、山东淄博、江西九江、四川成都高性能氟硅材料基地
08	特种玻璃基地
	重点建设陕西咸阳、江苏、广东、河南洛阳、安徽特种玻璃基地
09	先进陶瓷基地
	重点建设山东、江苏、浙江先进陶瓷基地
10	高性能复合材料基地
	重点建设江苏连云港、山东威海、吉林碳纤维及其复合材料基地，重庆、山东泰安、浙江嘉兴等高性能玻璃纤维及其复合材料基地，北京、广东、山东等树脂基复合材料基地，湖南碳 / 碳复合材料基地，四川成都综合性复合材料基地

7.2.3 新材料重点工程分布

1. 碳纤维低成本化与高端创新示范工程

工程目标：到 2015 年，碳纤维产能达到 1.2 万 t，基本满足航空航天、风

力发电、运输装备等需求。

主要内容：组织开发聚丙烯腈基（PAN）碳纤维的原丝产业化生产技术，突破预氧化炉、高低温碳化炉、恒张力收丝机、高温石墨化炉等关键装备制约，开发专用纺丝油剂和碳纤维上浆剂。围绕聚丙烯腈基（PAN）碳纤维及其配套原丝开展技术改造，提高现有纤维的产业化水平，实现 GQ3522 型（拉伸强度 3 500 ～ 4 500MPa，拉伸模量 220 ～ 260GPa）千吨级装备的稳定运转，降低生产成本。加强 GQ4522（拉伸强度≥ 4 500MPa，拉伸模量 220 ～ 260GPa）、QZ5526（拉伸强度≥ 5 500MPa，拉伸模量≥ 260GPa）等系列品种技术攻关，实现产业化。开展大功率风机叶片、电力传输、深井采油、建筑工程、交通运输等碳纤维复合材料应用示范。

江苏连云港、山东威海、吉林碳纤维及其复合材料基地。代表企业：中复神鹰、威海拓展、神舟碳纤维和江城碳纤维。

2. 稀土及稀有金属功能材料专项工程

工程目标：力争到 2015 年，高性能稀土及稀有金属功能材料生产技术迈上新台阶，部分技术达到世界先进水平，在高新技术产业领域推广应用达到 70% 以上。

主要内容：组织开发高磁能积新型稀土永磁材料等产品生产工艺，推进高矫顽力、耐高温钕铁硼磁体及钐钴磁体，各向同性钐铁氮粘结磁粉及磁体产业化，新增永磁材料产能 2 万 t/a。加快开发电动车用高容量、高稳定性新型储氢合金，新增储氢合金粉产能 1.5 万 t/a。推进三基色荧光粉、3D 显示短余辉荧光粉、白光 LED 荧光粉产业化，新增发光材料产能 0.5 万 t/a。加快高档稀土抛光粉、石油裂化催化材料、汽车尾气净化催化材料产业化，新增抛光粉产能 0.5 万 t/a、催化剂材料 0.5 万 t/a。组织开发硬质合金涂层材料、功能梯度硬质合金和高性能钨钼材料，新增高性能硬质合金产能 5 000t/a、钨钼大型制件产能 4 000t/a、钨钼板带材产能 3 000t/a。推进原子能级锆管、银铟镉控制棒材产业化，形成锆管产能 1 000t/a。

稀土金属功能材料代表企业：北京中科三环高科技股份有限公司、内蒙古自治区包钢稀土（集团）高科技股份有限公司、江门市科恒实业股份有限公司、有研稀土新材料股份有限公司、包头天骄清美稀土抛光粉有限公司、甘肃稀土新材料股份有限公司等。

稀有金属功能材料代表企业：宁夏回族自治区东方钽业股份有限公司、九江

有色金属冶炼有限公司、肇庆多罗山蓝宝石稀有金属有限公司等。

3. 高性能膜材料专项工程

工程目标：到 2015 年，实现水处理用膜、动力电池隔膜、氯碱离子膜、光学聚酯膜等自主化，提高自给率，满足节能减排、新能源汽车、新能源的发展需求。

主要内容：积极开发反渗透、纳滤、超滤和微滤等各类膜材料和卷式膜、帘式膜、管式膜、平板膜等膜组件和膜组器，满足海水淡化与水处理需求。提高氯碱用全氟离子交换膜生产工艺水平，组织开发动力电池用高性能电池隔膜、关键装备和全氟离子交换膜及其配套含氟磺酸、含氟羧酸树脂，实现产业化。建成氯碱全氟离子交换膜 50 万 m^2/a、动力电池用全氟离子交换膜 20 万 m^2/a 及其配套全氟磺酸树脂和全氟羧酸树脂，加快发展聚氟乙烯（PVF）太阳电池用膜。

4. 先进电池材料专项工程

工程目标：先进储能材料、光伏材料产业化取得突破，基本满足新能源汽车、太阳能高效利用等需求。

主要内容：组织开发高效率、大容量（≥ 150mA•h/g）、长寿命（大于 2 000 次）、安全性能高的磷酸盐系、镍钴锰三元系、锰酸盐系等锂离子电池正极材料，新增正极材料产能 4.5 万 t/a，推进石墨和钛酸盐类负极材料产业化，新增负极材料产能 2 万 t/a，加快耐高温、低电阻隔膜和电解液的开发，积极开发新一代锂离子动力电池及材料，着力实现自主化。开发高转化效率、低成本光伏电池多晶硅材料产业化技术，研发新型薄膜电池材料。加快推进超白 TCO 导电玻璃等关键产品产业化，形成产能 5 000 万 m^2/a。积极发展太阳能真空集热管，推动太阳能光热利用。开展大容量钠硫城网大储能电池研究，完成大功率充放电，电池寿命 10 年以上，实现 10MW 示范电站并网。

5. 新材料创新能力建设专项工程

工程目标：提升新材料产业主要环节自主创新能力。

主要内容：进一步加大关键实验仪器、研发设备、控制系统的投入力度，建设一批具有较大规模、多学科融合的高层次新材料研发中心，重点开展材料的组分设计、模拟仿真、原料制备等基础研究，研发推广材料延寿、绿色制备、纳米改性、材料低成本和循环利用等共性技术，开发氧氮分析仪、高温测试仪、超声检测仪、扫描电子显微镜等专用设备。在重点新材料领域，建立和完善 30 个新材料研究开发、分析测试、检验检测、信息服务、推广应用等专业服务平台，推动新材料标准体系建设和应用设计规范制订，促进新材料创新成果产业化和推广应用。

参考文献

[1] 吴其胜，戴振华，张霞．新能源材料 [M]．上海：华东理工大学出版社，2012．
[2] 翁敏航．太阳能电池——材料、制造、检测技术 [M]．北京：科学出版社，2012．
[3] 雷永泉．新能源材料 [M]．天津：天津大学出版社，2000．
[4] 杨德才．锂离子电池安全性——原理、设计与测试 [M]．成都：电子科技大学出版社，2012．
[5] 李伟伟，姚路，陈改荣，等．锂离子电池正极材料研究进展 [J]．电子元件和材料，2012，31（3）：77—80．
[6] 童忠良，张淑谦，杨京京．新能源材料与应用 [M]．北京：国防工业出版社，2008．
[7] 蒋利军，张向军，刘晓鹏，等．新能源材料的研究进展 [J]．中国材料进展，2009，28（7—8）：51—55．
[8] 毛宗强．燃料电池 [M]．北京：化学工业出版社，2005．
[9] 艾德生，高喆．新能源材料——基础与应用 [M]．北京：化学工业出版社，2010．
[10] 马红丽．我国新材料产业发展回顾与展望 [J]．中国科技投资，2011(2)：35—37．
[11] 国家发展和改革委员会高技术产业司，中国材料研究学会．中国新材料产业发展报告（2013）[M]．北京：化学工业出版社，2014．
[12] 吴江．新材料与功能材料的战略地位和发展趋势概述 [J]．科技创新导报，2011(30)：62．
[13] 李彪．浅析化工新材料的产业发展与趋势 [J]．化工管理，2014(20)：213．
[14] 叶鼎铨．全球风电复合材料发展概况 [J]．玻璃纤维，2009(2)：43—46．
[15] 刘学青．储能材料研究 [J]．现代材料动态，2012(5)：10．
[16] 墨柯．超导储能技术及产业发展简介 [J]．新材料产业，2013(9)：61—65．
[17] 谢金龙，李艳霞，初振明，等．超级电容器储能材料的研究进展 [J]．材料导报，2012(15)：14—18．
[18] 解海宁．电化学储能方式及储能材料综合分析 [J]．智能电网，2014（7）：4—8．
[19] 李晓辉．相变储能材料的研究进展 [J]．河北省科学院学报，2012，29(2)：58—62．
[20] 田雁晨．相变储能材料 [J]．绿色建筑，2009(4)：32—34．
[21] 耿翠玉．全球及中国锂离子电池及电解液行业发展分析 [J]．新材料产业，2010(10)：42—48．
[22] 陈凯，史红亮．清洁能源发展研究 [M]．上海：上海财经大学出版社，2009．
[23] Masson G，Latour M，Rekinger M，et al．Global market outlook for photovoltaics 2013—2017[J]．European Photovoltaic Industry Association，2013：12—32．
[24] 工业和信息化部原材料工业司．中国新材料产业年度发展报告（2013）[M]．北京：

电子工业出版社，2013.
[25] 汉能控股集团，全联新能源商会．全球新能源发展报告2014[R]．中华新能源，2014.
[26] 李临西．火炬计划对新材料产业的推动[J]．新材料产业，2001(9)：13—14.
[27] 北京市科委，北京新材料发展中心．2003—2004北京新材料产业年度发展报告[J]．新材料产业，2004(6)：91—93.
[28] 蒋利军，张向军，刘晓鹏，等．新能源材料的研究进展[J]．中国材料进展，2009(z1)：50—56.
[29] 虞华，郭宗林，陈光亚，等．新能源产业现状及发展趋势II[J]．中国电力，2011(1)：83—85.
[30] 王永忠．环境问题与绿色材料[J]．中国科技信息，2010（18）：24—25.
[31] 师昌绪．新材料产业会有更好更快发展——2007年元旦祝词[J]．新材料产业，2007(1)：1.
[32] 崔民选．中国能源发展报告[M]．北京：社会科学文献出版社，2010.
[33] 姚兴佳．可再生能源及其发电技术[M]．北京：科学出版社，2010.
[34] 张九红．中国新材料产业的困境与突破[J]．新材料产业，2004(8)：10—13.
[35] 张淑谦，董忠良．化工与新能源材料及应用[M]．北京：化学工业出版社，2010.
[36] 滨川圭弘，等．能源环境学[M]．郭成言，译．北京：科学出版社，2003.
[37] 赵建，詹水华，王东京，等．多晶硅生产技术发展方向探讨[J]．广州化工，2014，42(15)：17—20.
[38] 郑继忠，孙宾宾．多晶硅材料及其生产工艺研究现状与趋势[J]．科技与企业，2014（12）：334.
[39] 王晓英，王宇光，谷新春，等．多晶硅制备工艺及发展趋势[J]．化工进展，2013，32(6)：1336—1340.
[40] 闫琦．多晶硅产业现状与发展趋势[J]．氯碱工业，2013，49(7)：1—5.
[41] 顾小云，王正凯，祝洪良，等．硅化镁法生产硅烷的副产物六氨氯化镁[J]．浙江理工大学学报，2009，26(6)：910—913.
[42] 卢培浩，吴克杰．两种工业合成单硅烷的工艺介绍[J]．化学世界，2012(1)：52—55.
[43] 卢培浩，于剑昆，吕国会．电化学法制备单硅烷工艺概述[J]．低温与特气，2009，26(6)：4—9.
[44] 卢培浩，马建智．歧化法制备单硅烷的工艺进展[J]．广东化工，2010，37(9)：81—82.

[45] 余京松，沃银花，张金波．对国内硅烷生产的几点看法 [J]．低温与特气，2010，28(1)：7—11．
[46] 禹泽海，孙鹏，汪春平，等．高纯铜溅射靶材的发展及现状 [J]．山西冶金，2007(5)：4—6．
[47] 洪涛．铟资源现状与发展探讨 [J]．企业科技与发展，2013（13）：22—23．
[48] 李长江．中国金属镓生产现状及前景展望 [J]．轻金属，2013（8）：9—11．
[49] 厉英，曾杰，闫晨，等．高纯镓制备技术的研究进展 [J]．材料导报 A：综述篇，2013，27(7)：85—88．
[50] 李静贤，刘家军．硒矿资源研究现状 [J]．资源与产业，2014，16(2)：90—97．
[51] 吴昊．高纯硒提纯工艺研究 [D]．长沙：中南大学，2011．
[52] 胡智向，朱刘，王晓峰．碲的资源分布与工业应用 [J]．广东化工，2014，20(41)：77—78．
[53] 王珍珍，张福良，胡永达，等．世界锂资源开发利用形势分析与探讨 [J]．中国矿业，2014（23）：1—5．
[54] 罗荣晋．我国镍资源利用现状及前景展望 [J]．中国城市金融，2013（11）：53—55．
[55] 张福良，殷腾飞，周楠，等．我国石墨资源开发利用现状及优化路径选择 [J]．炭素技术，2013，32(6)：31—35．
[56] 钟江春．我国萤石资源利用概况及其发展趋势 [J]．化学工业，2011，29(12)：11—15．
[57] 高慧丽，王卫青．萤石资源需要特别呵护 [N]．地质勘查导报，2010-3-20(2)．
[58] 朱迎秋．浅谈铜企业的可持续发展 [J]．改革与开放，2010（2）：56．
[59] Tolcin A C．Indium，in metals and minerals：U．S．Geological Survey Minerals Yearbook 2009[R]．2011．
[60] 佚名．铟资源枯竭在即 [J]．现代材料动态，2006(9)：19．
[61] 伍赠玲．铟的资源、应用与分离回收技术研究进展 [J]．铜业工程，2011（1）：25—29．
[62] 尹书刚，陈后兴，罗仙平．镓的资源、用途与分离提取技术研究现状 [J]．四川有色金属，2006：24—27．
[63] 刘家军，冯彩霞，郑明华．硒矿资源研究现状 [J]．科技前沿与学术评论，2001：16—20．
[64] 王培良．世界碲资源及其提取回收和应用 [J]．环球视野，2012（12）：62—63．
[65] 殷德洪．全球锂的资源、应用及其再生利用 [J]．世界有色金属，2011（8）：

25—29.
[66] 吴展，胡琴．镍二次资源回收利用的现状与展望[J]．矿产与地质，2013（27）：59—62.
[67] 龚卫星，李艳荣．我国稀土废料回收利用技术与现状[J]．中国资源综合利用，2013，31(9)：36—38.
[68] 传秀云．石墨资源状况和产业发展前景[J]．高科技与产业化，2014（2）：50—55.
[69] 王诗瑜．我国的芒硝资源及其利用研究[J]．化学工程师，2004（1）：37—38.
[70] 张世超．中国能源材料战略需求与中长期科技发展[J]．新材料产业．2008（8）.
[71] 刘铁，王九云．战略性新兴产业项目风险分析与防范[J]．学习与探索，2011（5）.
[72] 戴世峰．电力企业投资新能源风险分析[J]．中国外资．2014（6）.
[73] 李秋月，张喜荣．新能源发电风险分析[J]．2014（15）.
[74] 孙文静．新型锂离子电池正极材料产业化项目风险分析[D]．镇江：江苏大学，2010.
[75] 汪文祥．完善我国战略性新兴产业投融资机制的对策建议[J]．中国经贸导刊，2012（2）.
[76] 陈立泉．我国新能源材料产业化现状（上）[J]．产业透视．2005(7)：30—35.
[77] 中智正业信息技术研究院．2014 镍氢电池产业发展报告[R]．北京：北京中智正业信息技术研究院，2014.
[78] 陈晓芸．镍氢电池：性能和成本介于几种电池之间[OL]．[2007-06-16]．http://auto.sina.com.cn/news/2007-06-16/1229284718.shtml.
[79] 张洪辉，石庆升．车用锂离子动力电池关键材料的研究[J]．电源技术，2013，37(5)：877—880.
[80] 张守一，葛新权，张真真．把沙漠建成太阳能发展的基地[J]．华北电力技术，2010(2)：42—46.
[81] 徐蔚莉，李亚楠，王华君．燃煤火电与风电完全成本比较分析[DB/OL]．北极星新闻网，2014-07-21．http://news.bjx.com.cn/html/20140721/529614.shtml.
[82] 陈凯，史红亮．清洁能源发展研究[M]．上海：上海财经大学出版社，2009：135—138.
[83] 中国电子材料行业协会经济技术管理部．中国太阳电池及硅材料行业调研报告[R]．2011.
[84] 苏波．中国新材料产业年度发展报告[M]．北京：电子工业出版社，2013.
[85] 李冰心．2013 年全球锂资源开发现状[J]．新材料产业，2013(7)：32—36.

[86] 北京智研科信咨询有限公司. 2014—2019 年中国金属硅市场全景调查与行业运营态势报告 [R]. 2014.

[87] 国家发展和改革委员会高技术产业司. 中国新材料产业发展报告 (2013) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 40—44.

[88] 吴辉. 2013—2014 年中国锂离子电池产业发展研究年度报告 [R]. 赛迪顾问, 2013.

[89] 罗永康, 李炜, 胡红. 碳纤维复合材料在风力发电机叶片中的应用 [J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(5): 53—57.

[90] 常瑜. 中国光伏发展报告: 2011[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.

[91] 程小爱. 球型天然石墨表面改性用于锂离子电池负极材料的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.

[92] 刘贵富. 产业链基本理论研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.

附 录

我国钒、钛、碲、铋战略资源潜力分析

第 1 章　我国碲、铋资源开发利用现状

1.1　碲、铋资源概况

1.1.1　世界碲、铋资源概况

根据美国地质调查局（USGS）2015 年公布的报告，全球铋金属储量为 32 万 t，储量基础为 68 万 t。铋资源主要分布在中国、澳大利亚、秘鲁、墨西哥、玻利维亚、美国、加拿大和日本。中国的铋储量居世界第一，储量大约为 24 万 t，占世界总储量的 75%；储量基础约为 47 万 t，占世界的 69%。排在中国之后的玻利维亚和墨西哥铋储量均为 1 万 t，美国和加拿大各有 5 000t。如附表 1-1 所示。

附表 1-1　全球铋资源储量

国　家	储　量（t）	国　家	储　量（t）
美国	5 000	墨西哥	10 000
玻利维亚	10 000	其他国家	50 000
加拿大	5 000	全球总量	320 000
中国	240 000		

资料来源：USGS，2015。

根据美国地质调查局（USGS）2015 年公布的报告，全球碲资源储量达 24 000t，美国、秘鲁、加拿大、日本、俄罗斯碲资源相对丰富（如附表 1-2 所示）。但是，USGS 的统计是以铜资源为基础，因为 20 世纪 90 年代前人们普遍认为世界大部分可回收碲都伴生于铜矿床中。然而，近年来国内外一系列重要的碲化物型金银矿床的发现和地质勘探研究表明：分散元素碲的地球化学性状远比传统认识的要活跃得多，它可以大规模富集、矿化形成具有经济价值的独立矿床或工业矿体（如四川石棉大水沟碲铋金矿床、山东归来庄碲金矿床、河南北岭碲化物型金矿等），这使得人类对碲资源分布有了重新认识。

附表 1-2　全球碲资源储量分布

国　家	储　量（t）	国　家	储　量（t）
美国	3 500	秘鲁	3 600
加拿大	800	俄罗斯	NA
日本	–	其他国家	16 000

资料来源：USGS，2015。

1.1.2 国内碲、铋资源储量及分布

1. 国内铋资源储量及分布

铋是我国的优势资源，我国的铋储量居世界第一，储量大约为 24 万 t，占世界总储量的 75%。基础储量为 47 万 t，占世界的 69%。

我国已有铋矿 70 多处，铋金属储量在 1 万 t 以上的大中型矿区有 6 处，储量占全国总储量的 78%，其中 5 万 t 以上金属储量的大型矿区 2 处，储量占全国总储量的 66%。铋资源分布在全国 13 个省市自治区，其中储量最大的是湖南、广东和江西，这三个省的储量占全国总储量的 85% 左右；其次分布在云南、内蒙古、福建、广西和甘肃等省。湖南郴州和赣南地区最为丰富，郴州已探明铋金属储量约占全国的 73%，全球的 50%。其中，湖南省郴州市金般塘矿区勘探储量累计估算锡铋资源量 82 万 t（包括铋 10 万 t），潜在经济价值为 70 亿元，成为世界最大的铋矿床。

2. 国内碲资源储量及分布

勘探数据显示，我国现已探明伴生碲储量处于世界第三位。伴生碲矿资源较为丰富，全国已发现伴生碲矿产地约 30 处，保有储量近 1.4 万 t。碲矿区散布于全国 16 个省（区），但储量主要集中在广东 (占全国总量的 42%)、江西 (41%) 和甘肃 (11%) 三省。

我国的碲矿也主要伴生于铜、铅锌等金属矿产中。根据主矿产储量推算，我国还有未计入储量的碲矿资源约 1 万 t，这将改变碲资源的分布格局并有可能使我国成为一个碲矿资源大国。

碲主要赋存于铜镍矿和硫铁矿中，主要分布在安徽铜陵县铁山头铜矿、江西九江县城门山铜矿、甘肃白家咀子铜镍矿、吉林通化县赤柏松硫化铜镍矿和四川石棉县大水沟碲铋硫铁矿中。

1.2 铋资源品质特性分析

1.2.1 铋矿的主要形式、产地及特性

铋在自然界中以游离金属和矿物的形式存在，为稀有金属元素，在地壳中平均含量为 0.17ppm，接近于银，为钨丰度的 13%。自然界中铋以单质和化合物两种状态存在。

国外铋资源主要与铅、铜矿等相伴生，主要矿物有自然铋（Bi）、辉铋矿（Bi_2S_3）、泡铋矿（Bi_2O_3）、菱铋矿（$nBi_2O_3 \cdot mCO_2 \cdot H_2O$）、铜铋矿（$3Cu_2S \cdot 4Bi_2S_3$）、方铅铋矿（$2PbS \cdot Bi_2S$）等。

我国铋资源几乎全部为伴生矿产，以共、伴生组分形式赋存于钨、锡、钼、铜、铅、锌等有色金属矿床中。其中与钨矿伴生最多，占铋总储量的 70%；其次是与铜、铅锌伴生，占总储量的 17%；还有少量铋伴生于铁 (5.2%)、锡 (5.3%)、钼等金属矿床中。

我国铋储量最大的是湖南、广东和江西，这三个省的储量占全国总储量的 85% 左右；其次分布在云南、内蒙古、福建、广西和甘肃等省。附表 1-3（详见 430 ～ 431 页）列举了一些较为典型的伴生铋的矿床 (石) 主成分及矿物主要性质、资源品质情况。

1.2.2 国内金属铋的生产来源

我国是铋资源非常丰富的国家，也是目前世界上金属铋产量较大的国家之一。我国金属铋的主要来源有以下三个途径：

（1）钨、锡矿石 —— 选矿富集 —— 铋精矿 —— 火法或湿法 —— 精铋。

（2）铜、铅、锡冶炼过程中副产铋，铜、铅、锡电解精炼阳极泥中提取金属铋或含铋合金 (低熔点合金)。这部分副产铋在我国铋金属生产中占有相当比重。

（3）其他钨、锡、铜、铁选冶过程中含铋物料综合回收的泌。如钨、锡精矿及其精选过程的复杂含铋物料、铜转炉烟尘、含铋铜精矿湿法冶炼浸出渣、含铋褐铁矿炼铁高炉炉底合金等含铋物料，通过湿法或火法冶炼过程提取金属铋。

我国有丰富的钨、锡矿，在大多数钨、锡矿床中都伴有各种铋矿物，这是我国主要的铋资源。其中最主要的是目前正在生产的钨 - 铋 - 硫 (黄铁矿) 或钨 - 钼 - 铋共生的石英脉型黑钨矿床和钨、钼、铋、萤石、锡石金属矽卡岩型白钨矿床；其次是一些锡石多金属硫化矿矿床。这些矿床 (石) 中的铋含量高低不一 , 有的铋含量已达到单独开采工业品位以上 , 是目前生产铋精矿的重要来源。

目前钨矿生产中按精矿金属产出比例计，铋金属为钨的 1.5% 左右；按储量平均计算，铋金属一般为钨的 3% ～ 6%，少数矿床 (区) 则超出这个比例，个别矿床其金属含量大致相等。对锡矿而言，伴生铋金属数量也很可观。据某锡矿产区统计，各类锡矿床中每吨锡约伴生铋 0.031t，其中多金属硫化矿脉锡矿床中每吨锡伴生的铋高达 0.059t。

1.3 碲资源品质特性分析

1.3.1 碲矿的主要形式、产地及特性

碲的矿床类型主要有铜—镍硫化物矿床、黄铁矿型矿床、火山成因硫矿床、

含硒碲的金—银矿床、热液成因铅锌矿床、锡石—硫化物矿床等。自然界中碲虽可形成多种独立矿物，如自然碲、硒碲矿、碲金矿、碲铋矿等，但一般不具独立开采的工业意义。碲主要是铜、铅、锌、镍及黄铁矿等矿石加工和提炼过程中提取的。

矿石结构包括辉碲铋矿型、细脉浸染状白云石型、星散浸染状白云石型、块状磁黄铁矿型、网脉状磁黄铁矿型－白云石型和石英脉型。矿石中碲、铋赋存状态较简单，绝大部分以辉碲铋矿（Bi_2TeS）和楚碲铋矿（BiTe）形式存在，仅少量为黄碲矿（TeO_2）、单质碲（金属 Te）、辉铋矿（Bi_2S_3）、碲铋华形式存在。矿石中除含附加值较高的 Te、Bi 外，还含有 Au、Ag 元素，以自然金形式分布在黄铁矿、黄铜矿中。附表 1-4（详见 432 ～ 433 页）列出了含碲的矿床（石）主成分及矿物主要性质、资源品质情况。

我国碲资源保有储量 13 395t，居世界之首。广东曲江大宝山、江西九江城门由铜矿（占全国伴生碲储量的 23.6%，碲矿石品位为 0.002 8%)、甘肃金川白家嘴子为我国三个大型特大型伴生碲矿床，三者储量之和为全国伴生碲储量的 94%。1991 年 8 月，四川省石棉县大水沟发现的全球第一例独立碲矿床，改变了碲资源的分布格局。

1.3.2 国内金属碲的生产来源

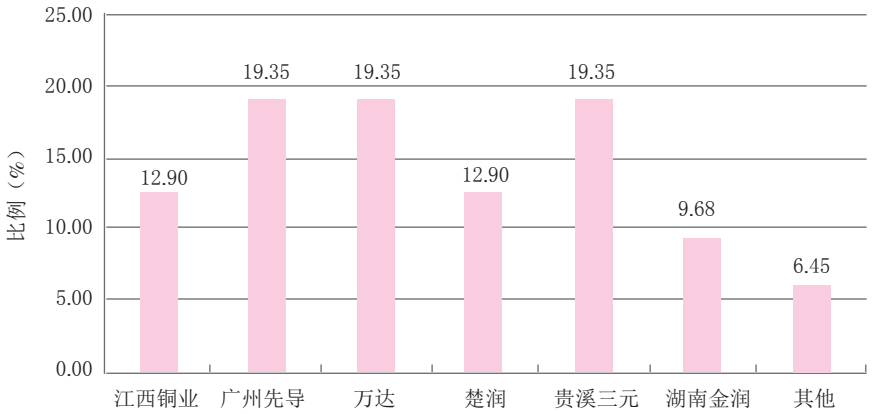
全球碲产量在 600t 左右，年消费总量在 400 ～ 500t。主要碲产国有加拿大、日本、中国、秘鲁、美国、哈萨克斯坦、俄罗斯等国家。江西铜业、铜陵有色等企业是中国产碲大户。未来随着全球铜产量的增加和碲回收率的提高，碲的产量增长速度将大大提高。

碲大部分伴生在铜、铅、金、银的矿物中，金川铜镍硫化矿伴生元素中，碲含量为 0.000 2% ～ 0.000 7%。铜电解精炼过程中产生的阳极泥是现今提取碲的主要原料，80% 的碲从中提取。

铅碲渣是阳极泥提取贵金属工艺过程中的一种含碲渣，渣中含有 3% ～ 8% 的碲，含铅 40% 以上。金川阴极铜产量达到 40 万 t 时，每年产铅碲渣约 400t，其中含有碲金属量达 15 ～ 30t。碲还可从贵金属冶炼过程中形成的副产品、碲化铋热电制冷装置产生的副产品、生产碲化镉薄膜太阳能的副产品中回收。随着碲价格的升高，从碲矿中开采碲将成为重要的碲来源之一。

国内生产的碲主要来自江西贵溪大三元集团、江西铜业集团公司、广东先导稀材股份有限公司、四会市万达稀贵有限公司、湘潭县楚润碲业有限公司、

湖南永兴县金润有色金属有限公司等 6 家公司，各公司金属碲产量分布见附图 1-1。



附图 1-1 我国金属碲产量分布

数据来源：5NPLUS。

1.4 铋的生产工艺

铋冶金可分为火法和湿法两大类，目前铋的生产仍以火法冶金为主。就冶金过程本身来说，铋冶金又可分为粗炼和精炼。粗炼可以是火法也可以是湿法，精炼则可分为火法精炼和电解精炼。一般来说，不管粗炼采用火法或湿法，都需要经过精炼才能产出金属铋。

粗炼的方法因原料而异，以硫化铋精矿、氧化铋和铋的混合矿、氧化铋渣以及氯氧化铋等作为炼铋原料时，采用混合熔炼法，配入适量的铁屑、纯碱、萤石粉、煤粉等，在反射炉中进行混合熔炼，得到粗铋，送去精炼。

高品位铋精矿的处理，大都采用火法反射炉熔炼。以铅的火法精炼过程中产生的钙镁铋浮渣为原料时，先将浮渣加热，使其中所含的铅下沉取出，继续加热熔渣，熔化后，加入氯化铅或通入氯气，以除去钙和镁，得到富含铋的铅铋合金，再送精炼。精炼一般包括氧化除砷锑碲、加锌除银、氯化除铅锌、高温除氯四个步骤。

1.4.1 国内铋火法冶金技术

铋熔炼可以分为熔析熔炼法、沉淀熔炼法、还原熔炼法和混合熔炼法。四种熔炼方法的配料、熔炼步骤基本相同。熔炼作业的基本步骤是：进料—熔化 (含沉淀)—放渣—造锍 (含沉淀)—放铜锍—降温—放铋。

铋的火法熔炼一般都采用反射炉或回转炉。反射炉熔炼采用人工敞开配料，

劳动条件差，烟气系统庞大，烟尘收集和返回时操作环境恶劣，金属回收率较低，能耗高。反射炉熔炼整体上属于水平低的冶炼方法。

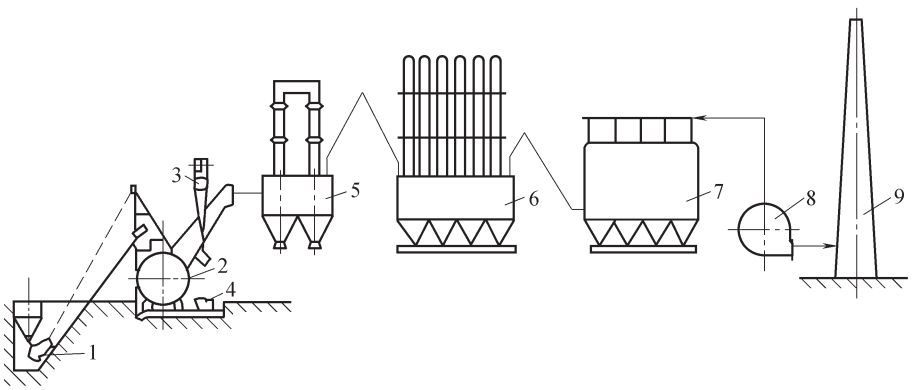
目前，工业上应用比较多的是沉淀熔炼法和混合熔炼法，这两种方法的实质基本相同，即加入适量的铁屑将矿石中的铋置换出来，反应如下：

$$Bi_2S_3+3Fe=2Bi+3FeS$$

但是，不能保证矿石中的硫都以 FeS 形式进入铜锍，当加入铁量不足或炉况不正常时，部分硫以 SO_2 状态进入烟气。

铋冶炼厂一般规模不大，几乎没有工厂为处理烟气中的 SO_2 设置净化吸收工序，因此，SO_2 对环境造成了污染。如果矿石中含有其他有害元素，如砷、氟、铍等，在火法熔炼时必然有部分有害元素进入烟气，它们造成的危害有时比 SO_2 更为严重。

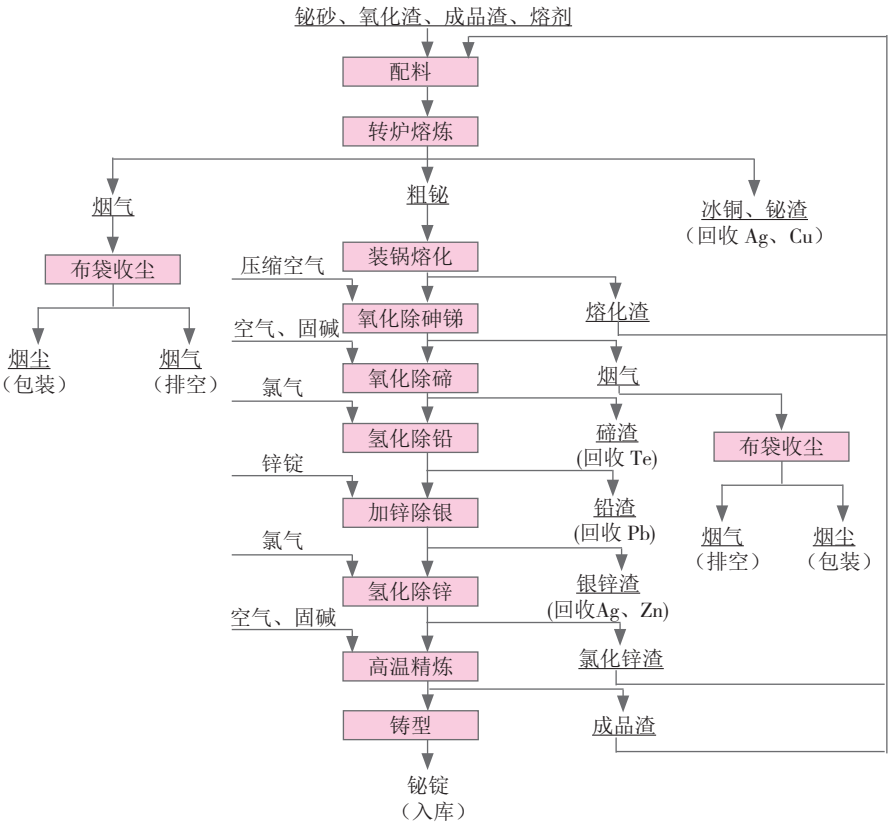
铋的火法冶炼流程比较简单，一般都采用反射炉或回转炉。反射炉熔炼采用人工敞开配料，劳动条件差，烟气系统庞大，烟尘收集和返回时操作环境恶劣，金属回收率较低，能耗高。反射炉熔炼整体上属于水平低的冶炼方法。附图 1-2 为铋熔炼设备流程图。



附图 1-2　铋熔炼设备流程图

1- 料斗；2- 反射炉或转炉；3- 炉前电葫芦；4- 渣斗；5- 表面淋水冷却器；6- 冷却烟道；7- 布袋收尘器；8- 排烟风机；9- 烟囱

火法炼铋包括粗炼和精炼两部分。粗炼工艺具体分为还原熔炼、沉淀熔炼和混合熔炼，混合熔炼是目前普遍采用的工艺。所谓混合熔炼，是在同一冶炼炉内对硫化铋进行沉淀熔炼，对氧化铋进行还原熔炼，同时氧化铋、硫化铋之间还发生反应熔炼。工艺流程如附图 1-3。



附图 1-3　火法炼铋工艺流程

资料来源：亚洲金属网。

1.4.2　国内铋湿法冶金技术

20 世纪 60 年代后期，随着复杂难选低品位铋矿和高硅铋矿的增多，我国开始致力于铋矿湿法冶金新工艺的研究。云锡第三冶炼厂建成湿法车间处理锡铋混合精矿，用三氯化铁做浸出剂，在酸性氯盐体系中浸出铋矿，使矿物中的铋呈铋氯络合物的形态进入溶液，用铁粉置换产出海绵铋，经火法精炼生产精铋。

根据铋矿的不同组成和原料的差异，从降低作业成本、解决环境污染、三氯化铁的再生和溶液中有价金属的富集等方面，有 7 种典型的新的湿法冶金流程，国内铋湿法冶金工艺对比见附表 1-5（详见 434 ～ 435 页）。这些工艺大都已进行扩大试验或半工业、工业试验，其中矿浆电解法已应用于工业生产。

1.5　碲的生产工艺

由于地壳中碲几乎没有单一且可回收的矿物，而是以碲化物的形式浸染在一

些重金属（主要是铜、金和银）矿物中，因此，工业上以冶金工业的副产品形式来回收碲。由于铜的产量巨大，目前工业上主要从加工处理铜所产生的阳极泥中回收碲，从铜阳极泥中回收的碲量超过全球碲供应量的 90%。另外，冶炼钼、铀和铅矿石所产生的烟尘和烟气及铅提炼渣中也能回收碲。

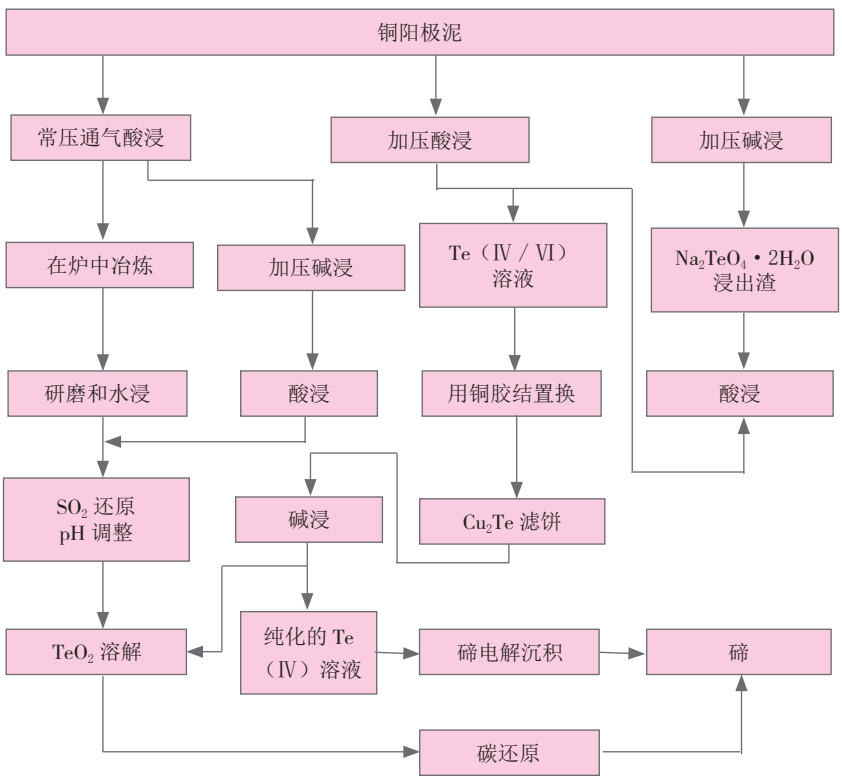
世界各国不同精炼厂阳极泥的物相和组成不同，其采用的处理流程也各不相同，因此碲的分离提取方法也不同。目前，国内外碲的分离提取工艺大致可分为火法、湿法以及微生物法三种。

1.5.1 国内碲火法冶金技术

国内碲的三种火法冶金工艺对比分析见附表 1-6（详见 436 ～ 437 页）。从表中可以看出，从物相和组成不同的阳极泥中采用火法冶金提碲的同时，还可回收硒，但都存在着流程长、污染大、回收率低等问题。

1.5.2 国内碲湿法冶金技术

从铜阳极泥中回收碲的湿法冶金工艺包括浸出、沉淀和精炼这三个工序，其工艺流程见附图 1-4。



附图 1-4　从铜电解阳极泥中回收碲的工艺流程

湿法冶金从铜阳极泥中浸出碲，有碱性氧化加压浸出法、氧化酸浸法、氯化法、溶剂萃取法、液膜分离法、吸附法，几种浸出方法的比较列于附表 1-7（详见 438 ～ 439 页）。从表中看出，碱性氧化加压浸出法、氯化法虽有工业应用，但存在原料消耗大、操作环境恶劣等问题。高效、清洁、节能的工艺尚无应用。

1.5.3 微生物法提取工艺

微生物法提碲，主要是利用微生物在一定生长条件下与矿石中碲的化合物发生作用（如氧化、吸附、还原）而实现碲的分离回收。亚碲酸盐对大多数真核和原核生物具有高的毒性，但 α－变形菌纲中的革兰氏阴性菌对亚碲酸盐具有高抗性，主要通过甲基化和还原作用将亚碲酸盐还原为更难溶的单质碲。

2003 年，Rajwade 等提出用微生物还原的方法还原含碲溶液的生物工艺，即将含碲 10mg/L 的溶液中 pH 值控制在 5.5 ～ 8.5，温度控制在 25 ～ 45℃，用微生物吸附—还原沉淀元素碲，可有效代替强还原剂，从而提高效率、降低生产成本，这一理论开创了生物冶金在碲的提取工艺上应用的先河。

微生物冶金是利用微生物将矿石中有价元素选择性浸出直接制备高纯金属及其材料的新技术，具有成本低、资源利用率高和对环境危害小等优点，特别适合处理低品位、复杂、难处理的矿，在资源短缺和环境污染问题日益严重的今天，引起了高度关注。该技术自 1958 年美国利用微生物浸铜和 1966 年加拿大利用微生物浸铀的研究及工业化应用之后，显示出极大的优越性。当前，国际上有美国、日本、智利、西班牙、加拿大、印度、南非等 30 多个国家开展了微生物在矿冶工程中的应用研究工作。

目前有研究人员对石棉碲铋矿床中的低品位（一般碲的品位小于等于 1%）、难处理矿石进行生物湿法冶金研究，提出了微生物浸出—微生物还原回收分离工艺，并取得了较好的成效，表明采用生物冶金方法提取回收碲、铋是完全可行的，这种具有我国自主知识产权的低品位碲铋矿生物冶金技术体系有待建立和完善。

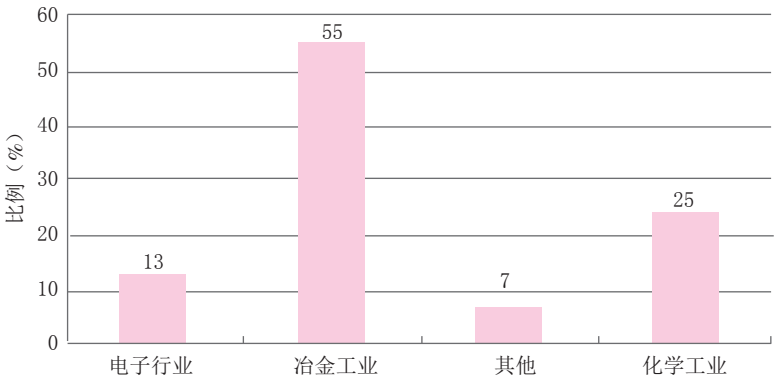
微生物法提碲的优点是：成本低、无污染，对开发利用低品位、难选冶的矿产资源具有广阔的工业应用前景。但该法生产周期长，生产效率低，不利于大规模生产碲。

碲具有较明显的两性特征，易分散，含碲物料化学成分复杂，碲的分离提取困难，大多数碲分离提取技术仍然处于实验研究阶段，所以应努力促使现有技术的工业化，并建立较为完善的理论体系。

1.6 碲、铋资源潜力分析

1.6.1 碲、铋应用前景分析

碲、铋作为重要的战略资源，用金属单质的价格来评估，会大大低估其潜在的价值。通过深加工，碲、铋可在材料、能源、医药、化工等领域获得广泛应用，显示出更为可观的经济价值。碲的应用消费结构如附图 1-5 所示。



附图 1-5 碲的应用消费结构

数据来源：USGS。

碲、铋是重要的金属添加剂，在冶金、金属等行业发挥“工业味精”的特殊作用。向金属中添加少量碲、铋，可显著提高其性能。如向铜合金中添加少量碲，能显著改善其切削性能，提高导电性和导热性，用于制作高机械强度和高传导性的部件。

碲、铋还是温差发电、热电制冷、特殊光学器件、超导材料等高端技术领域的基础原材料。碲化铋（Bi_2Te_3）、碲化铅（PbTe）等热电材料可利用其塞贝克（Seebeck）效应，直接将热能转化为电能，应用于工业、汽车尾气废热及太阳光热发电；也可利用其帕尔贴（Peltier）效应，将热能从低温端自动释放到高温端，取代现有的机械式压缩制冷，实现无噪声、无振动、无制冷剂的定点精密制冷，应用于冰箱、空调、医疗、大规模集成电路以及大功率 LED 的散热等领域。

含碲化合物具有优良的光敏特性，在资源普查、卫星航测、激光制导等方面获得了广泛的应用。涉及红外线到紫外线光谱的激光器、光二极管、光接收器等光电子仪器，均采用 ZnTe、CdTe、HgTe、CdHgTe、PbSnSeTe 等制作半导体部件。

铋作为对人体无害的“绿色金属”，有取代铅、锑、镉、汞等有毒元素的趋势，正被日益广泛地应用于各种领域。用铋取代铅可制作无铅易熔玻璃（＜ 600℃），

用作真空焊料、微型电路防护层、瓷釉、颜料、金属表面涂层以及玻璃封接等。

铋化合物具有收敛、止泻、防腐作用，用于医药已有 100 多年的历史。目前我国铋类药物的生产制造已居世界首位，已开发出各类铋类药物用于治疗痢疾、溃疡、肠炎、处理创伤和止血、辅助抗癌以及防止吸收射线等。

铋还是高温超导体材料（如 Bi-Sr-Ca-Cu-O）不可或缺的组分之一，现已形成产业化生产，用于大电流密度的电网输电。此外，铋在非线性光学材料、易熔合金、石油化工催化剂、高分子阻燃剂等领域也得到广泛的应用。

1. 传统应用领域

传统用途主要作为高速钢、有色金属合金的添加剂、石油化工催化剂和化工制品等。碲在冶金工业中的应用占应用总量的 78%，在石油和化学工业中占应用总量的 12% 左右，在电子和电气工业中占应用总量的比例超过 8%。另外碲在玻璃、陶瓷、医药等方面也有重要作用。

2. 高新技术领域

碲具有特殊热电和光电转化性能，高新科技产业的发展使之成为半导体致冷（热）、红外探测，特别是太阳能转化为电能的上佳材料。资料表明，随着宇航、原子能、电子工业等尖端技术的飞速发展，对包括碲在内的稀散金属的需求与日俱增。

新型薄膜太阳电池的研究近十年来受到高度重视，碲化镉薄膜太阳电池显现出其他电池无法比拟的优势：在生产成本上大大低于晶体硅和其他材料的太阳电池，并且它和太阳的光谱最一致，可吸收 95% 以上的阳光，生产工艺标准化，低能耗，生命周期结束后可回收利用，强弱光均可发电，温度越高效果越好。目前电池转换效率已经突破 13.38%，碲化镉薄膜太阳电池在全球市场中的占有率不断上升。

目前，碲化镉薄膜太阳电池的生产成本正在逐步接近甚至低于传统发电系统，可以预见，未来三至五年内，碲化镉薄膜太阳能电池的市场占有份额将大幅增长。当前限制碲化镉薄膜太阳电池规模量产化的一个主要原因是原材料碲的储量和商业产量。

1.6.2 市场需求分析

国内外太阳电池产业和半导体制冷等产业的蓬勃发展，对碲的需求量大幅增加。其中太阳电池产业近五年年均增长率达 43%，2012 年世界光伏发电装机达 14GW，按光电产业年产电能 3 000MW 和产生每兆瓦电能需碲约 90 ～ 130kg 计算，

年需求量约 400t。

我国为碲主要消耗国，仅半导体制冷业一项对碲的年需求量即可达 40 ～ 50t，加上全球制冷、冶金及太阳电池等行业需要，年总需求量约 700 ～ 800t。据行业专家预测，2020 年全球相关行业碲总需求量约 1 600t。

碲产量一半以上用于冶金工业，主要消费增长领域是光电仪器——激光器、光二极管、光接收器，碲是该领域的主要原料。但新的应用领域可能会打破供需关系，如太阳能发电。工业发达国家计划增大太阳能电站投入，在 2030—2040 年满足本国 25% ～ 30% 的电能需求。

2012 年 3 月 27 日，科技部印发了《太阳能发电科技发展“十二五”专项规划》，明确指出，促进太阳能发电的规模化应用，晶硅电池效率 20% 以上，硅基薄膜电池效率 10% 以上，碲化镉、铜铟镓硒薄膜电池实现商业化应用。制约太阳电池 CdTe 基材发展的原料因素是碲的生产。CdTe 基材的太阳电池发电 1kW 需消耗碲约 60g，以此计算，到 2030 年，制造太阳电池的碲需求量将增大到 400 ～ 500t（即超过目前全球的碲产量），需求非常强劲。

需求量的增长必然会刺激产量的增加，但就目前工艺状况而言，碲产量明显增长的可能性不大，因为自 R-L-SW-EW 工艺推广应用以来，铜产量增大，但并没出现碲产量同步增加的情况。

因此，预计生产碲原料来源的不足与碲消费量的增大会引发碲价的波动，若碲价持续保持在较高价位必将受到投资者的高度重视，很可能加速回收碲新工艺的出现。

1.6.3 高纯碲产业延伸及配套产业发展需求预测

1. 建设稀散高纯金属和化合物金属晶体材料的检测平台

要想生产出具有特殊用途的高科技材料，拥有材料的分析手段是先决条件。但目前国外用于材料检测的高级检测装备基本不对我国出口，比如最新一代的二次辉光质谱放电分析设备，是美国新材料行业发展的最重要的检测装备之一。而美国拥有这样设备的检测中心，对中国的样品检测有严格限制，对于可能用于军事用途的材料拒绝检测，因此制约了我国的高新材料产业的发展。通过建设检测平台，引进先进设备，建立先进的杂质微量、痕量分析方法（包括重点分析高纯材料中的氧、氮、碳、硅、氯等），并以此为基础，建立一个国家级的高纯金属材料产业开发、检测中心，为碲产业化开发和全国高新材料行业提供服务。同时消化技术，自主创新，为我国生产此类设备先行做技术准备，最终形成我国自主

研发生产此类检测设备的能力。

可能带动和影响的产业有：检测技术的开发，检测芯片或传感器的开发；检测设备所需配套的电子技术设备的研发生产；成套检测设备的集成、生产和服务。产业规模估算有 130 亿元左右。

2. 建设基于稀散金属化合物晶体的成套生产技术装备基地

化合物半导体材料的单晶生长工艺技术中，单晶生长炉的制备技术是世界尖端前沿技术，尽管国内一些科研机构或企业可以生产，但其技术含量及性能与国外同行比是非常落后的。在未来的 30 ～ 50 年中，单晶生长炉设备在国家高科技领域应属于国家级重大装备。化合物半导体材料单晶生长及器件的应用技术的开发应该是国家引导支持并大力投资培育的高科技重大项目，是国家高科技长期战略的重要组成部分。必须大力培养下游产业链的合格人才，开发新技术，攻克高纯半导体材料的单晶生长技术工艺和半导体单晶器件制备技术。化合物半导体材料的单晶生长技术在国内还处于试验探索阶段，虽有几家科研机构和个别高校取得了一些进步，但依然是机构各自为政。面对发达国家在此方面的技术封锁，我国在化合物半导体材料的单晶生长及单晶器件制造等工艺技术产业化领域急需突破，以满足国内需求。

如果在四川石棉县建设“中国碲谷”，可以整合这些技术和团队，建设全链条的晶体生长设备制造业。四川省内企业已经具有 10 种单质晶体和化合物晶体的生长设备制造经验，实施碲（铋）产业化开发和“中国碲谷”战略，就可能在此基础上优化和完善已有技术，为产业发展提供支持。

可能带动和影响的产业有：生产设备的研发，设备应用的材料研发生产；新型的控制技术研究；新型设备的集成生产和销售服务。产业规模估算在 200 亿元左右。

3. 建设基于碲系列稀散金属产品的研发中心，重点开发几个产品

以美国为首的科技大国已经着手研究替代硅存储芯片的新一代存储半导体材料 —— 拓扑绝缘碲化铋材料。美国的少数科研机构已经完成了拓扑碲化铋存储芯片的理论模型建立和研究，并获得相关的技术验证结果。尽管硅单晶存储芯片材料的产业化早已推广到国内很多企业中，但拓扑碲化铋存储芯片的理论及应用研究在国内还是空白，因此从长远的国家发展战略来看，我国开展拓扑碲化铋存储芯片的研究势在必行。

目前碲化镉技术已经成熟，碲锌镉已研发出合金材料，高纯系列半导体金属

单质材料已成功生产并销售，在“中国碲谷”发展战略规划中，拓扑碲化铋存储芯片的理论及应用研究将是我国高纯碲产业链延伸的一个重要分支，必须加快碲芯片的原材料碲铋合金的研发和生产，为晶体生产做材料准备。

可能带动和影响的产业有：薄膜材料光伏产业；建筑一体化节能产业；计算机芯片设计产业；半导体芯片制造产业；可能改变目前的基于英特尔芯片的全部工业格局。其产业规模和产业价值不可估量。

1.6.4 碲矿产业化开发利用发展初步规划

1. 碲矿产业化开发的意义和必要性

碲多呈伴生态，伴生于众多有色金属矿床，以及有色金属选－冶废渣之中，一般品位较低，具独立成矿可直接开采利用的四川石棉大水沟碲（铋）矿床，为我国特有的矿产资源。

长期以来，国内外碲的生产途径主要限于从铜阳极泥和有色金属冶金残渣中提取。近几年四川省石棉县大水沟碲铋矿开发研究开创了直接利用高品位碲矿石加工生产金属碲的先例，但综合回收率不高，仅分别达 50% ～ 60%，大量低品位碲（铋）矿未被开发利用。

国内主要大中型有色金属矿床以及开采金属矿山的尾矿矿渣中，碲及相关伴生稀有分散元素除铜阳极泥、炼铅废渣部分得到回收利用外，大多数含碲冶金残料、废渣、尾矿等二次资源中碲的回收问题未能解决。

实施碲（铋）矿产业化开发，可以节约和充分利用石棉大水沟地区特有的碲矿资源，扩大全国碲的储藏量和供应量，促进碲（铋）产业进一步发展和延伸产业链，提高碲资源及二次资源的开发与利用水平，降低尾矿废渣对生态环境的污染，为碲（铋）产业、新能源、热电等高技术重大产业的可持续发展提供资源保障。

稀散碲系列金属晶体材料对国家战略领域和高新技术材料领域具有重大战略意义，如何生产出合格的稀散碲系列金属晶体材料，是我国必须要考虑的科技问题。国内很多科研机构在研究稀散碲系列金属晶体生长领域进行了长期的研究工作，取得了一些进展，但还远远落后于国外的前沿水平。建设“中国碲谷”产业链的目标是利用半导体材料生长出来的合格晶体科学合理地制造出各种性能优良的高技术半导体器件，石棉县大水沟碲铋资源的产业化开发，将为“中国碲谷”的建设提供充足的原料，是建设“中国碲谷”战略规划的重要保证。

2. 规划目标任务

（1）查明资源储量　进一步查清全国范围内矿产储量和可采地段，基本查明矿区碲矿资源量。加强碲矿成矿条件和成矿机理的研究，基本查明矿产的富集和形成规律。初步确定矿山资源远景，进一步为矿床开发利用等提供地质依据，提供进一步探采工作建议。

（2）探索低品位矿石选矿技术　主要针对低（0.1% 以下）至极低 (0.02% 以下) 碲含量的贫矿石，开展科技攻关，确定矿体边界品位（工业开采最低品位），实现碲矿资源充分利用和矿山的可持续开发。根据初步勘查储量以及获得首采矿段矿石量选择开采方案，建设碲矿选场（厂），同时开展低品位碲矿石半工业选冶试验。

（3）筹建湿法冶金生产基地。

（4）规划建设碲（铋）产业园区　依托省级工业园区，建设碲（铋）产业园区，建设以碲、铋等稀有元素为核心的稀贵金属高新产业发展园区，发挥资源、环境等方面的优势，逐步形成科技含量大、产业附加值高、周边区域经济带动力强的国家稀有战略资源储备开发生产基地。

（5）创新资源的开发模式　创新开发石棉县碲（铋）矿，与攀枝花、凉山州的钒钛、稀土开发建立协调联动机制，整合要素资源，从源头入手，实现国家重要资源的科学开发、就地转化，将国家战略安全与地方经济发展有机结合，防止资源的无序、低水平开发。

（6）深化资源的综合利用　建立碲铋产业研发中心，建设相关产业科研生产基地，设立院士工作站和博士后流动站，研发自有知识产权的碲、铋矿石选冶技术，提高碲、铋及其伴生资源的回收率和综合利用效率，推进精深加工技术的发展和能力的提高，为国家经济发展、国防建设提供重要的物质、科技保障。

第 2 章　我国钒、钛资源潜力分析

2.1　我国钒钛磁铁矿资源及开发潜力分析

2.1.1　钒钛磁铁矿资源概况

1. 钒钛磁铁矿储量

（1）世界钒钛磁铁矿资源状况　全球钒钛磁铁矿储量比较丰富，较为集中地分布在几个国家，主要资源国为中国、俄罗斯、加拿大、南非、美国、巴西、

芬兰、挪威等。次生砂矿床多分布于澳大利亚、印度、非洲沿海诸国。各国钒钛磁铁矿的资源差异较大，根据钛含量不同可分为低钛型和高钛型两类。

（2）中国钒钛磁铁矿资源状况　我国钒钛磁铁矿矿床分布广泛，储量丰富，目前已探明储量的矿区有 1 834 处，总保有储量矿石 463 亿 t，居世界第 5 位，主要分布在四川攀西 (攀枝花－西昌) 地区、陕西汉中、河北承德、湖北郧阳和襄阳、广东兴宁、山西代县、辽宁朝阳及黑龙江呼玛等地区。

我国现已探明的主要大型磁铁矿床有：

1）攀西地区钒钛磁铁矿：位于四川省西南部，包括攀枝花和凉山州的 20 余个县市。南北长约 300km，已探明大型、特大型矿床 7 处，中型矿床 6 处。矿床主要分布在攀枝花的红格、米易白马、安宁、中干沟、湾子田、新街、中梁子等矿区，凉山州的矿床主要分布在太和、德昌、会理等矿区。

攀西地区钒、钛资源储量大，探明储量近 90 亿 t，矿产资源潜力评价预测矿石资源量约 190 亿 t。其中，钛资源（以 TiO_2 计）储量近 6 亿 t，约占全国储量的 87%；钒资源（以 V_2O_5 计）储量 1 763 万 t，约占全国储量的 40%。矿石中伴生铬、钴、钪、镍、镓等金属和稀贵金属，其储量均达到相应元素的特大型矿山等级。攀西地区主要钒钛磁铁矿区资源储量见附表 2-1。

附表 2-1　攀西地区主要钒钛磁铁矿区资源储量

矿区规模	矿区	累计探明矿石储量 / 亿 t	主要共伴生资源储量/万t	
			TiO_2	V_2O_5
大型	攀枝花矿区	15.19	8 281	202
	白马矿区	17.21	10 170	372
	红格矿区	35.74	32 605	685
	太和矿区	13.21	5 431	231
	安宁村矿区	5.83	6 025	130
中小型	白草矿区	0.73	560	12
	马鞍山矿区	0.47	354	9
	新街矿区	0.41	365	12
合　计		88.79	63 791	1 653

2）河北承德地区的钒钛磁铁矿：钒钛磁铁矿是承德市的主导优势矿产，截至 2012 年年底，探明钒钛磁铁矿资源总量 83.72 亿 t，占我国总保有储量的

18.1%，位居全国第二位，是我国除四川以外唯一的大型钒钛磁铁矿基地，主要分布在大庙、黑山、头沟的基性和超基性杂岩体内。

3）广东省兴宁市霞岚钒钛磁铁矿：矿区位于广东省兴宁市罗岗镇。经普查和详查，探明矿山远景储量达 4.5 亿 t，已普查探明的矿石量为 9 345.4 万 t，矿石中 TiO_2 平均品位为 6.08%。

4）陕西洋县毕机沟钒钛磁铁矿：矿区位于洋县、佛坪县、石泉县三县交界处，主体属洋县桑溪乡范围。现已探明 TiO_2 储量 215.8 万 t，据勘探论证，远景储量可达 1 亿 t 以上。其原矿 TiO_2 平均品位为 6.08%。此外，陕西省紫阳县境内也发现钒钛磁铁矿，已详查和普查的 5 处矿床，钛磁铁矿储量达 2.425 亿 t，TiO_2 储量为 1 311.52 万 t，且伴生钒、磷等多种有用矿产。

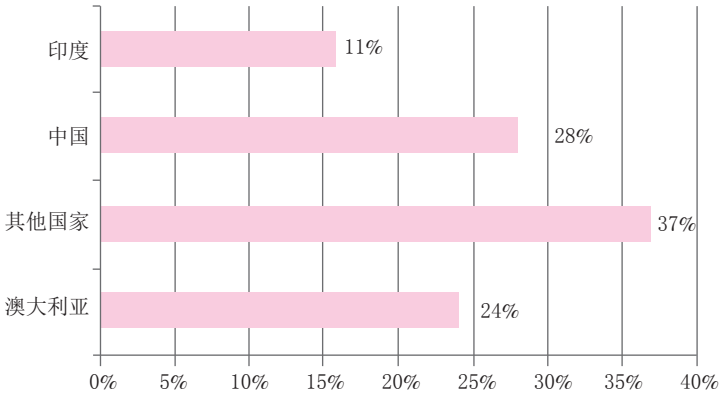
5) 甘肃大滩钛铁矿：大滩钛铁矿地处天祝藏族自治县赛什斯镇，该矿是特大型单一钛铁矿，具有矿物组分简单、规模巨大、品位低等特点。目前共发现 9 个矿区、55 个矿体，资源储量约 3 315.38 万 t，其中 TiO_2 平均品位为 6.17%。

2. 钛资源储量

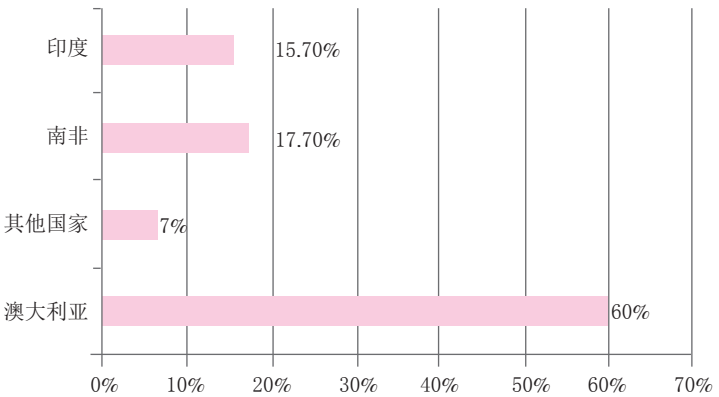
（1）世界钛资源状况　钛是一种重要的战略资源，在地壳中的含量按元素丰度列居第 9 位。钛具强烈亲氧性，在自然界中多以氧化物或钛酸盐的形式存在，且经常与铁共生。目前，自然界已发现的 TiO_2 含量大于 1 %（质量百分数）的钛矿物有 140 多种，在现有技术水平与经济条件下，有利用价值的钛矿物主要是钛铁矿、金红石和锐钛矿。国外钛资源主要以钛铁矿为主。

据美国地质调查局（USGS）2015 年公布的数据，世界锐钛矿、钛铁矿和金红石的资源总量超过 20 亿 t，其中钛铁矿储量约为 7.2 亿 t（未统计中国钒钛磁铁矿中的钛铁矿资源），金红石储量约为 4 700 万 t，二者合计储量约 7.67 亿 t。世界钛资源主要分布在澳大利亚、南非、加拿大、中国和印度等国家，其中中国（2 亿 t）、澳大利亚（1.7 亿 t）、印度（8 500 万 t）、南非（6 300 万 t）、巴西（4 300 万 t）。中国钛铁矿储量约占全球的 28%，排名全球第一，见附图 2-1。

澳大利亚金红石资源储量 2 800 万 t，占全球金红石总量的 60%，是金红石资源最丰富的国家；南非金红石资源储量 830 万 t；印度金红石资源储量 740 万 t。世界金红石资源分布见附图 2-2。



附图 2-1　世界钛铁矿储量分布



附图 2-2　世界金红石资源分布

（2）中国钛资源状况　我国钛资源非常丰富，已探明钛资源分布在 21 个省、市、自治区，矿区达 110 多个。据《钒钛资源综合利用和产业发展“十二五”规划》，我国钛资源主要赋存于钒钛磁铁矿、钛铁矿和金红石矿中，已探明钛资源储量（以 TiO_2 计）7.22 亿 t。钒钛磁铁矿钛资源占总储量的 95%；钛铁矿中钛资源约占总储量的 5%，主要分布在云南、海南、广东、广西等地。金红石矿储量较少，主要分布在湖北、河南、山西等地。钛资源总保有储量 9.65 亿 t（以 12%TiO_2 含量的原矿计），其中钛铁矿占 99%，储量位居世界第一。钛铁矿中岩矿占 93.7%，砂矿占 6.3%；金红石矿中岩矿占 98%，砂矿占 2%。

实际情况是，我国拥有钛资源较多的几个省区是（以 12%TiO_2 含量的原矿计）：四川攀西地区占全国的 90.54%，河北占全国的 2.7%，广东占全国的 1.76%，云南占全国的 1.19%。

1）钛铁矿资源。四川的钛铁矿（岩矿）资源储量（以 TiO_2 计）约 6.6 亿 t，储量基础 2.07 亿 t，储量约 1.5 亿 t，约占全国同类储量的 95.1%，居全国首位；河北省的储量基础（以 TiO_2 计）约 572 万 t，储量 380 万 t，约占全国同类储量的 3.3%；陕西和山西钛铁矿储量分别占全国的 0.46% 和 0.35%。现已探明储量的钛铁矿岩矿矿区的资源量列于附表 2-2。

附表 2-2　我国主要钛铁矿岩矿矿区资源量

矿产地	表内矿储量 / 万 t（A+B+C+D 级）	表外矿储量 / 万 t（A+B+C+D 级）	TiO_2 平均品位（%）	资源量 / 万 t
四川攀枝花	60 637.1	49 916.5	11.42	9 709.28
四川红格	182 889.0	172 607.0	10.56	32 390.5
四川白马	119 150.8	30 427.6	6.93	4 496.11
四川潘家田	23 284.0	14 205.0	10.86	2 000.0
四川中干沟	16 052.9	7 924.6	12.14	1 264.2
四川安宁村	8 476.0	11 354.0	9.29	921.5
四川湾子田	5 058.0	4 706.0	12.18	489.0
四川中梁子	1 250.0	4 510.0	14.07	276.05
四川新街		4 149.5	9.53	182.43
四川马鞍山	1 134.0	693.0	14.24	100.0
四川西昌太和	26 039.0	106 771.0		6 223.0
四川凉山白草	17 390.6	13 585.7	11.80	1 500.0
四川凉山秀水河	8 629.6	1 030.0	11.11	486.0
河北承德			8.00	2 031.0
广东省兴宁市霞岚			6.08	9 345.4
陕西洋县毕机沟			6.00	215.8
陕西省紫阳县				1 311.52
甘肃大滩钛铁矿			6.17	3 315.38（C+D+E）

我国钛铁矿砂矿资源主要分布在广东、广西、海南和云南等省区，矿点比较分散，尚未发现大型矿床。我国砂矿钛铁矿的品位相对较低，大部分精矿中的 TiO_2 含量 48% ～ 52%，只在广西部分地区有 TiO_2 含量 54% ～ 60% 的高品位优质钛铁矿。全国共有钛铁矿砂矿区 66 处，其中大型 9 处、中型 15 处、小型 42 处。其矿床特点是矿点比较分散、规模小、品位低。海南和云南的储量较大。

2）金红石矿分布。我国金红石资源分为原生金红石矿和金红石砂矿两类，现已发现矿床、矿化点 88 处，主要分布在湖北、河南、陕西、江苏、山西和山东等地。

我国已发现的天然金红石资源 80% 以上是低品位原生矿石，矿物组成复杂、嵌布关系紧密，TiO_2 含量多在 1% ～ 4%。代表性的矿区如湖北枣阳大阜山、山西代县碾子沟、河南方城等，但规模化开采这类资源投资大、成本高，目前仅少量开采利用。

金红石砂矿包括海滨砂矿和残坡积型砂矿。海滨砂矿主要分布在海南、广东、广西和福建等地，金红石含量一般为 1 ～ 2kg/m^3。海南省锆英石矿中伴生的金红石矿总储量约 1.9 万 t。残坡积型金红石砂矿主要分布在河南、山东、湖北、湖南等省。河南金红石表内储量 218.45 万 t，占全国同类储量的 85%，其中方城柏树岗金红石矿规模最大。其他省份的表内储量分别为山东 17.68 万 t、湖北 9.24 万 t、湖南 6.99 万 t，分别占全国同类储量的 6.9%、3.6%、2.7%。该类矿床虽然规模较小、储量低，但矿石易采、易碎、易选，是目前金红石矿开发的主要矿石类型。

3. 钒资源储量

（1）世界钒资源储量　国外钒资源主要以钒钛磁铁矿为主。以金属钒和 V_2O_5 来统计全世界钒储量，各国统计的数据差异相当大。

根据美国地质调查局不完全统计（USGS），2013 年全球钒资源量已超 6 300 万 t，全球金属钒储量约 1 400 万 t，主要分布在中国（510 万 t）、俄罗斯（500 万 t）、南非（350 万 t）等国家，此外还有澳大利亚、美国、加拿大、新西兰等国家。目前国际市场上主要钒供应国为中国、南非和俄罗斯。

（2）中国钒资源储量　我国钒资源很丰富，是全球钒资源储量大国，储量（以 V_2O_5 计）4 290 万 t，约占世界总储量的 21%。钒资源广泛分布于 19 个省市（区），但主要集中在四川攀枝花地区和河北承德地区，攀枝花地区钒资源最为丰富（钒资源储量 1 862 万 t，国土资源部 2013 年数据）。

我国钒矿资源主要有两种形式，即钒钛磁铁矿和含钒石煤。

钒钛磁铁矿中钒资源占总储量的 53%，集中分布在四川攀西和河北承德地区；含钒石煤中钒资源占总储量的 47%，主要分布在陕西、湖南、湖北、安徽、浙江、江西、贵州等地。2012 年我国钒矿基础储量为 1 242.63 万 t。

4. 铬资源储量

铬是一种重要的战略物资，广泛用于冶金、电镀、制革、印染、橡胶等行业。世界上的提铬原料基本上都是铬矿，已探明铬储量约 75 亿 t。我国铬资源高度依赖进口，铬矿资源短缺，铬矿资源主要分布于西藏、新疆、内蒙古、甘肃等省区，分布分散，不利于开采。四川省攀枝花市红格钒钛磁铁矿中的铬含量，是全国其他地区已探明储量的近两倍，是目前我国最大的铬矿资源。作为我国主要的钒铬产业基地，攀枝花市拥有丰富的高铬型钒钛磁铁矿。攀枝花红格矿床钒钛磁铁矿的储量约 36 亿 t，铬资源总量约为 696 万 t（以 Cr_2O_3 计），极具开发价值。

5. 伴生稀贵金属资源储量

钒钛磁铁矿是四川省攀西地区的优势矿种，以攀枝花、白马、红格、太和等四大矿床为代表，产于辉长岩－橄榄岩等基性－超基性岩体中，属岩浆晚期分异型矿床。含矿岩体长达数十公里，宽一至数公里，分异良好，相带明显，韵律清楚。矿体呈似层状或透镜状分布于岩体中部或下部韵律层底部的暗色相带内，常有数个含矿带和多层矿体，厚度数十至一百多米，延深千米以上。

四川省攀西地区钒钛磁铁矿原矿中主要矿石矿物有钛铁矿、磁铁矿、钛铁尖晶石、镁铝尖晶石等，含少量磁黄铁矿、黄铁矿及钴、镍、铜的硫化物。矿石具陨铁结构、镶嵌结构，致密块状、条带状和浸染状构造，品位（%）全铁 TFe 为 23% ～ 40%、TiO_2 为 7% ～ 17%、V_2O_5 为 0.05% ～ 3.3%、Cr_2O_3 为 0.25% 左右。

四川省攀西地区钒钛磁铁矿中蕴藏储量巨大的钴、铬、镍和铜等有色金属资源，据估计钴、镍、铜资源储量均在百万吨以上。其中攀枝花矿区伴生有 90 万 t 钴、70 万 t 镍、25 万 t 钪、18 万 t 镓以及大量的铜、硫等资源。铬 (Cr_2O_3) 的保有储量为 900 万 t；钴的保有储量为 74.58 万 t；镓的保有储量为 11.36 万 t，仅攀枝花、红格、白马三大矿区伴生在表内矿中的镓就相当于 55 个大型镓矿床的储量；钪的保有储量为 10.96 万 t。

2.1.2 钒钛磁铁矿资源品质特性

1. 攀枝花地区钒钛磁铁矿资源品质特性

攀西钒钛磁铁矿矿床主要赋存于基性或基性－超基性岩体中，矿床成因为晚期岩浆岩分异型矿床。矿石自然类型主要有辉石岩型、辉长岩型、橄辉岩型、橄长岩型。矿石中主要金属矿物为钛磁铁矿、钛铁矿，此外还有少量黄铜矿、磁黄铁矿、硫镍钴矿等硫化矿物。脉石以硅酸盐矿物为主，包括普通辉石、橄榄石、斜长石及棕色角闪石等，此外还有少量磷酸盐和碳酸盐矿物。矿石多具有海绵陨

铁结构、粒状嵌晶结构，矿石构造多为浸染状构造、条带状构造、致密块状构造。矿石中主要有益组分为 Fe、Ti、V，伴生有益组分有 Co、Ni、Cu、Mn、Cr、Sc 等，但含量较低。攀西四大矿区钒钛磁铁矿矿石特征及化学组分见附表 2-3。

附表 2-3　攀西地区钒钛磁铁矿矿石特征与化学组分

矿　区	矿床类型	矿石自然类型	平均地质品位（%）		
			TFe	TiO_2	V_2O_5
攀枝花矿区	基性岩	辉长岩型	30.55	11.64	0.30
白马矿区	基性岩	辉长岩、橄长岩、橄榄岩型	27.10	6.09	0.27
红格矿区	基性—超基性岩	辉石岩、辉长岩、橄辉岩型	26.64	9.28	0.35
太和矿区	基性岩	辉长岩型	30.84	11.76	0.28

攀西钒钛磁铁矿矿石种类多，矿物组成复杂，有用矿物与脉石矿物多浸染嵌布。与国内其他钒钛磁铁矿资源相比，矿石的 TFe 品位偏低，TiO_2 含量较高（粒状钛铁矿含 TiO_2 为 52.6%，钛铁晶石含 TiO_2 约 36%），伴生有用元素较多（但品位较低，又属多金属共生岩矿，开发利用难度较大），必须进行综合开发利用才有较好的经济效益。

攀枝花钒钛磁铁矿各矿区所处的大地构造位置为康滇地轴中段，属晚期岩浆热液冷凝分异矿床，其主要特点如下：

1）矿、岩互层，断层及后期贯入岩脉发育，单个矿体规模较小且不规则，开采难度大。

2）矿石品位低。各品级的矿石在总储量中所占的比例为：金铁（TFe）含量大于等于 30% 的富矿仅占 10% ～ 15%，TFe 含量 20% ～ 30% 的贫矿石占 35% ～ 40%，TFe 含量 15% ～ 20% 的表外矿占 45% 左右。

3）有用组分多。钒钛磁铁矿是铁、钛、钒、铬、钴、镍、铜等多种有益元素共伴生矿。

4)矿石工艺性质复杂。矿物种类多，矿石结构种类复杂，固溶体分解结构丰富，钛磁铁矿微晶结构多样性，矿石工艺性质较为复杂，对资源综合利用的分离技术要求高。

钛磁铁矿是最主要的含铁工业矿物，分选回收铁的对象，也是钛、钒、铬、锰等组分的主要载体矿物。钛磁铁矿的物相是以磁铁矿为主的复合矿，其中的钛铁晶石和钛铁矿片晶不能用机械方法分离。因此，选出的铁精矿中钛的含量很高，

致使铁精矿中 TiO_2 含量可能高于原矿和尾矿。矿石中的金属钒绝大部分与铁矿物呈类质同象，在选矿过程中进入铁精矿。

攀枝花矿区原矿中的含钛矿物主要为粒状钛铁矿、钛铁晶石和少量片状钛铁矿。粒状钛铁矿含 TiO_2 为 52.6%，钛铁晶石含 TiO_2 约为 36%。在目前选矿技术水平下，粒状钛铁矿可以单独回收，而钛铁晶石和片状钛铁矿以及存在于脉石中的微量钛铁矿片晶不能单独回收。

因原矿结构致密且固溶了较高的 MgO，因此，选出的铁精矿和钛铁矿主要元素品位均不高。岩矿工作表明：可选的粒状钛铁矿中含有较高的 MgO 和少量的 CaO，前者含量约 5% ～ 7%，后者含量约 0.3% ～ 0.6%。镁、钙杂质一部分与钛铁矿呈类质同象，一部分呈微细脉状存在于钛铁矿中，因此用机械选矿方法很难使 MgO 和 CaO 含量大幅度降低。

钛铁矿在选铁尾矿中选取，产品为钛精矿。攀枝花钛精矿虽然含有较高的 MgO、CaO，深度加工利用技术难度较大，但成分稳定、酸溶性好、无放射性，这也是其获得大量应用的关键所在。

攀枝花钒钛磁铁矿中伴生的铬、镍、镓、钪等有价元素资源储量大，但品位较低，又属多金属共生岩矿，受现有选矿、冶炼技术条件和开发成本的限制，开发利用难度较大。

钴、镍除以硫化物包裹体或细脉状存在于钛磁铁矿、钛铁矿等矿物中以外，其余部分主要是以钴、镍的独立矿物存在于硫化物中，此种钴、镍矿物粒度微细，分布不均、颗粒大小不等，不能破碎解离，只能富集到硫化物精矿中，大部分可单独回收，钴、镍品位可达到 0.3% 以上，已符合工业利用要求，因此这部分钴、镍应在选矿过程中回收。

攀枝花钒钛磁铁矿中除含有上述铁、钒、钛、钴、镍等可回收的金属外，还含有镓、锰、铬，在硫化物中还含有铜、硒、碲和铂族元素，在钛铁矿中还含有钽、铌等元素。这些有价值元素有的已达到或接近综合利用品位，在选矿和冶炼过程中应考虑其综合回收。

2. 河北省承德地区钒钛磁铁矿资源品质属性

河北省承德地区钒钛磁铁矿产出于超基性岩体、基性岩体中，展布于深断裂或大断裂及其附近的次级构造中，从南到北集中分布于承德南部的密云—喜峰口孤山子次级断裂、中部的红石砬—大庙—娘娘庙深断裂和北部的康保—围场深断裂等三个成矿区带中。

承德地区是我国重要的钒钛磁铁矿资源基地，与四川省攀西地区相比，承德地区钒钛磁铁矿矿物结晶颗粒粗，矿石结构松散，硬度小，主要含有铁、钒、钛元素，不含其他稀有元素，易采、易磨、易选，选出的含钒铁精矿品位可达60% ～ 65%。

2.1.3 钒钛磁铁矿资源开发利用概况

我国钒钛磁铁矿的大规模开发利用，主要是从四川攀枝花—西昌地区钒钛磁铁矿资源综合利用科研工作开始的。经过 40 多年的开发，取得了一系列重大科研成果，建立起一套完整的钒钛磁铁矿选冶工艺。

1. 主要选矿产品及其物化性质

钒钛磁铁矿资源的开发利用，首先是矿石分选，目的是将这种复合矿石中多种有价矿物按不同性质分选成各类产品。

一是钛磁铁矿的选别，得到钒钛铁精矿，产率约为 33%。目前主要用于生产烧结矿和酸性氧化球团矿，作为含铁原料供给高炉，用于高炉冶炼回收铁和钒，生产含钒生铁和高钛型高炉渣。二是粒状钛铁矿的选别，从磁选钒钛铁精矿后所得的尾矿中通过重选、浮选和电选等流程得到 TiO_2 品位 40% ～ 60% 的钛精矿，作为提取钛的原料，用于生产高钛渣、钛白原料，产率约为 3%。三是硫化物选别，采用浮选工艺从选出钒钛铁精矿的尾矿中精选得到硫钴镍精矿，产率约为 0.3%，用于生产硫酸、钴化合物原料。其余剩下的是以脉石矿物为主的尾矿。

（1）钒钛铁精矿　经磁选生产的钒钛铁精矿是生产高炉冶炼用烧结矿、球团矿的主要含铁原料，其化学成分见附表 2-4。

附表 2-4　钒钛磁铁精矿化学成分

成分	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	V_2O_5	TiO_2	S
比例（%）	54.20 ～ 56.71	30.75 ～ 39.68	4.97 ～ 5.29	1.99 ～ 3.72	2.99 ～ 4.26	4.71 ～ 3.72	0.43 ～ 0.58	10.71 ～ 12.38	0.53 ～ 0.67

钒钛铁精矿中的主要有价元素是铁、钒和钛，钒以类质同象形式赋存于钛磁铁矿中，置换高价铁离子。钛磁铁矿是由主晶矿物、客晶矿、钛铁矿、镁铝尖晶石等形成的复合体，其中客晶矿物主要以微细粒状或板状沿主晶矿物裂隙或晶粒边缘结晶，紧密共生、嵌布微细。

（2）钛精矿　典型化学成分除二氧化钛 (TiO_2)、三氧化二铁 (Fe_2O_3)、氧化铁 (FeO) 外，还含有少量磷、硫、镁、钙等元素（附表 2-5）。

附表 2-5　钛精矿典型化学成分

成分	比例（%）	成分	比例（%）
TiO_2	46 ～ 48	MnO	0.65
V_2O_5	0.068	Cu	0.01
MgO	6	Co	0.01
Al_2O_3	1.4	S	＜ 0.2
CaO	1.2	P	0.01
SiO_2	＜ 3.50	Ni	0.06
TFe	31.56	FeO	32

钛精矿一般呈粉状，黑色，粒度 200 目左右。我国钛精矿主要产地有四川攀枝花、云南武定县、海南等。其中云南楚雄州武定县生产的钛精矿中钛、铁含量高，钙镁杂质少，是生产钛渣、钛白粉必不可少的钛原料。攀枝花产钛精矿属于岩矿型钛精矿，其中钛、铁含量较低，主要杂质 CaO、MgO 含量高，粒度细，还原性能较差。

（3）硫钴精矿　硫钴精矿的化学成分见附表 2-6。

附表 2-6　硫钴精矿典型化学成分

成分	比例（%）	成分	比例（%）
TiO_2	1.62	MnO	0.058
V_2O_5	0.28	Cu	0.32
MgO	2.16	Co	0.258
Al_2O_3	1.4	S	36.61
CaO	1.69	P	0.019
SiO_2	5.42	Ni	0.192
TFe	49.01		

2. 钒钛铁精矿的应用情况

目前钒钛铁精矿综合利用主要是如何回收铁、钒和钛，其中具有代表性的方法主要有高炉—转炉法和非高炉法。

（1）高炉—转炉法　高炉—转炉法是最早用于冶炼钒钛铁精矿的方法。根据高炉渣中 TiO_2 含量不同，含钛高炉渣可分为低钛型高炉渣、中钛型高炉渣和高钛型高炉渣。一般随渣中 TiO_2 含量提高，高炉冶炼变得困难。当炉渣中 TiO_2

含量大于 25% 后，高炉冶炼将出现泡沫渣和铁损增加现象，对冶炼过程造成不利影响。

高炉－转炉法冶炼钒钛铁精矿工艺流程是综合利用钒钛铁精矿的一种重要方法。我国攀钢、承钢以及国外俄罗斯邱索夫厂和下塔吉尔厂均使用此法进行钒钛磁铁矿冶炼。钒钛磁铁精矿粉经过烧结法或球团法造块后，送给高炉作为含铁原料。

在高炉冶炼过程中，烧结矿或球团矿中的铁氧化物、钒氧化物大部分被还原为零价态的金属，并富集于铁水中形成含钒铁水；随后含钒铁水进入提钒转炉进行吹炼，其中大部分金属钒被氧化进入炉渣形成含钒炉渣（钒渣）；提钒吹钒后的铁水形成半钢，半钢通过炼钢转炉再进一步冶炼成合格钢水；钒渣则通过后续一系列湿法工艺加工处理，成为五氧化二钒等合格钒产品。

高炉－转炉法存在的主要问题：附产的大量高钛型高炉渣中的钛未能回收利用，产渣量约 360 万 t/a，含二氧化钛 22% ～ 25%，每年不可逆地流失二氧化钛 79.2 万～ 90.0 万 t，大致相当于 2006 年全国钛白粉总产量（85.0 万 t）。

（2）非高炉法　随着焦炭资源的日渐枯竭，高炉生产将面临焦炭短缺的危机，因此发展非高炉法流程技术迫在眉睫。非高炉法炼铁技术的优点在于摆脱了对焦煤资源的依赖，并满足日益提高的环境保护要求，还可解决废钢短缺及质量不断恶化问题，实现资源的综合利用。

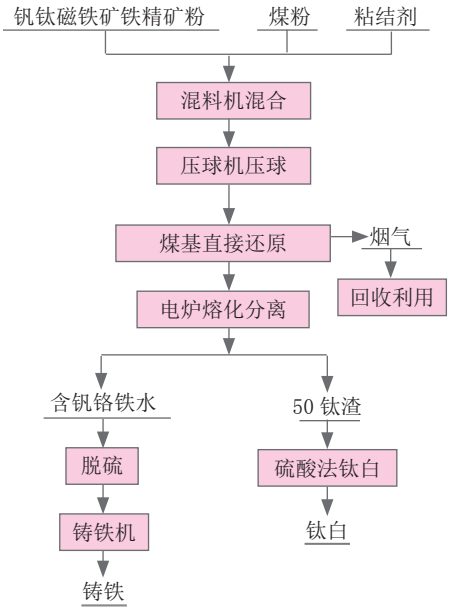
按还原过程中被还原矿石的形态不同，非高炉法可分为直接还原法和熔融还原法。

1）直接还原法。使用煤、气体或液态燃料为能源和还原剂，在铁矿石软化温度以下、不熔化即将矿石中的氧化铁还原，获得固态直接还原铁（DRI），其主要特点是还原过程中矿石始终为固态，并可有选择性地还原矿石中的某些元素，从而使另一些元素继续保持氧化状态。这一特点非常适用于还原铁品位偏低且共伴生元素较多的多元素复合矿。而钒钛磁铁矿正是典型的多元素复合矿，所以，直接还原法特别适用于钒钛铁精矿，并有利于铁、钒和钛的资源综合回收利用，具有广阔的应用前景。

按所用的还原剂形态不同，直接还原法可以分为煤基直接还原法和气基还原法。

煤基直接还原法是指以固体作为还原剂对铁矿石进行直接还原的主要工艺方法（附图 2-3）。主要采用价格低廉的非焦煤作为还原剂，可以有效地避免气基

直接还原法在地域上的限制。按直接还原所用还原炉不同，煤基直接还原法工艺主要有煤基转底炉工艺、回转窑工艺、隧道窑 / 车底炉工艺、煤基竖炉工艺等。其中回转窑、隧道窑单炉处理能力较小、还原时间长，生产率低；而转底炉、车底炉煤基直接还原由于原料适用性强而备受青睐。



附图 2-3　钒钛磁铁矿煤基直接还原工艺流程

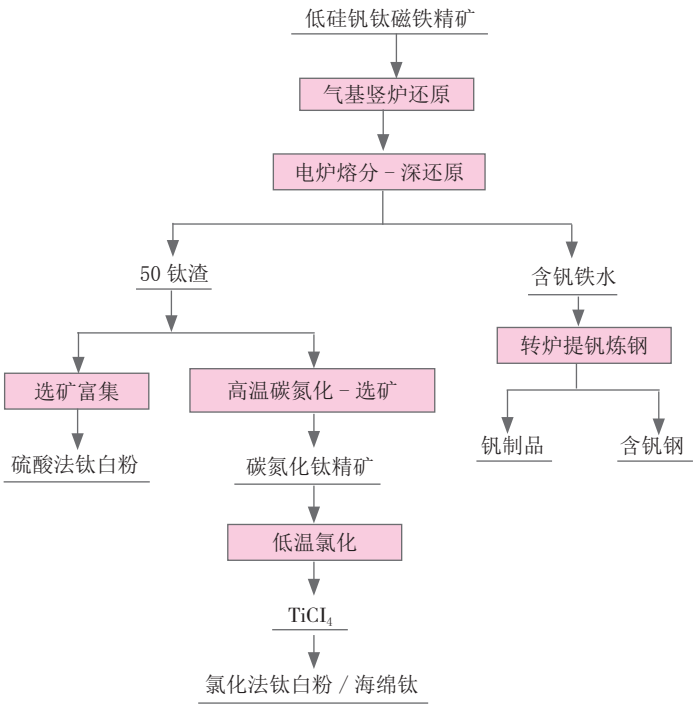
气基还原法是以气体 (CO、H_2 及其混合气体) 作为还原剂的矿石还原冶炼工艺，包括 MIDREX 法和 HYL- Ⅲ法等。气基还原法的主要优点是操作容易、能耗低、效率高，是铁矿石还原的重要方法之一，钒钛磁铁矿气基还原法工艺流程见附图 2-4。

MIDREX 法是目前相对完善、成熟的气基还原工业生产方法，主要适用于南美、中东等天然气资源较为丰富的国家和地区。由于我国缺少天然气，炉料必须造块，建设费用很高，所以并不适合中国。

MIDREX 法工艺中的气体还原剂由天然气经催化裂化制取，氧化球团矿从炉顶加入竖炉后经预热、还原和冷却三个阶段被天然气还原生成海绵铁。该法具有操作简单、能耗低、工艺成熟、生产率高等优点。

按照工艺设备不同，气基还原法可分为竖炉法、流化床法和反应罐法三种。

煤气与炉料在竖炉中逆向运动，炉料在下降过程中逐步被上升的煤气加热和还原，反应传质和传热效率较高。



附图 2-4　钒钛磁铁矿气基还原法工艺流程

流化床法由于铁矿粉单体颗粒在高温还原气流中被还原，还原速度快，是气基法中最合理的工艺方法，备受关注。

墨西哥的 HYL 还原法是唯一应用在工业上的反应罐法。HYL 流程采用 KELLOG 蒸汽转化制气技术，天然气首先通过活性炭进行脱硫，随后与过量水蒸气混合，在 850℃下进行催化裂化。炉料在反应罐中固定不动，通入热还原气体将其进行连续的预热、还原和冷却，然后定期停气，将炉料排出罐外。由于反应罐法的非连续性工艺流程落后于现代化的冶炼技术，因此，该工艺正在逐渐被竖炉法所取代。

2）熔融还原法工艺。熔融还原法是采用焦煤冶炼液态热铁水的一种工艺，整个熔炼过程分为固态预还原和熔态终还原两步，分别在两个反应器内完成。

熔融还原法工艺主要包括 COREX 法、FINEX 法和 HISMELT 法等。COREX 法是目前世界唯一成功应用于工业生产的熔融还原炼铁技术，由西门子－奥钢联开发，它能直接使用非焦煤、天然块矿做原料，生产出高炉品质的铁水。COREX 法生产的所有冶金步骤都在预还原竖炉和熔融气化炉两个独立的反应器中完成。因熔融还原的部分很少，故也将其纳入直接还原范畴。但必须指出，它的产品是

高温铁水，这与传统的直接还原产品不一致。

3. 钛精矿的应用情况

目前，钛精矿绝大部分用于生产钛白粉，用于生产钛渣的约 7%，也有少部分钛精矿用于生产钛铁。钛精矿的处理有两种方法：一是还原熔炼生产高钛渣，以高钛渣或金红石为原料经氯化获得粗 $TiCl_4$，将其精制后制取海绵钛或钛白；二是先是用硫酸直接分解，然后从硫酸溶液中析出偏钛酸，再制取钛白。

4. 硫钴精矿利用情况

钴、镍是国家重要的战略资源。随着航空航天及国防事业的快速发展，钴镍资源已成为国际上重点抢夺的资源。据国土资源部门统计，我国第一紧缺铂族金属元素，第二紧缺金属钴元素。全国每年金属钴消耗量约 4 万 t，约有一半靠进口。

我国缺少单独的钴矿床，大部分为共生矿或伴生矿，且品位较低，选冶提取较为困难，生产工艺复杂，回收率低，生产成本高。

攀西地区钒钛磁铁矿资源非常丰富，属多金属共生岩矿，其中钴、镍除以硫化物包裹体或细脉状存在于钛磁铁矿、钛铁矿等矿物中以外，其余部分主要是以钴、镍的独立矿物存在于硫化物中，此种钴、镍矿物粒度微细，分布不均、颗粒大小不等，不能破碎解离，只能富集到硫化物精矿中，每年选出约 3 万 t 的硫钴精矿。这种硫钴精矿品位较低，含钴 0.21% ～ 2.103%，含镍 0.18% ～ 4.305%，含铜 0.11% ～ 1.37%。附表 2-7 为攀枝花硫钴精矿主要化学成分。

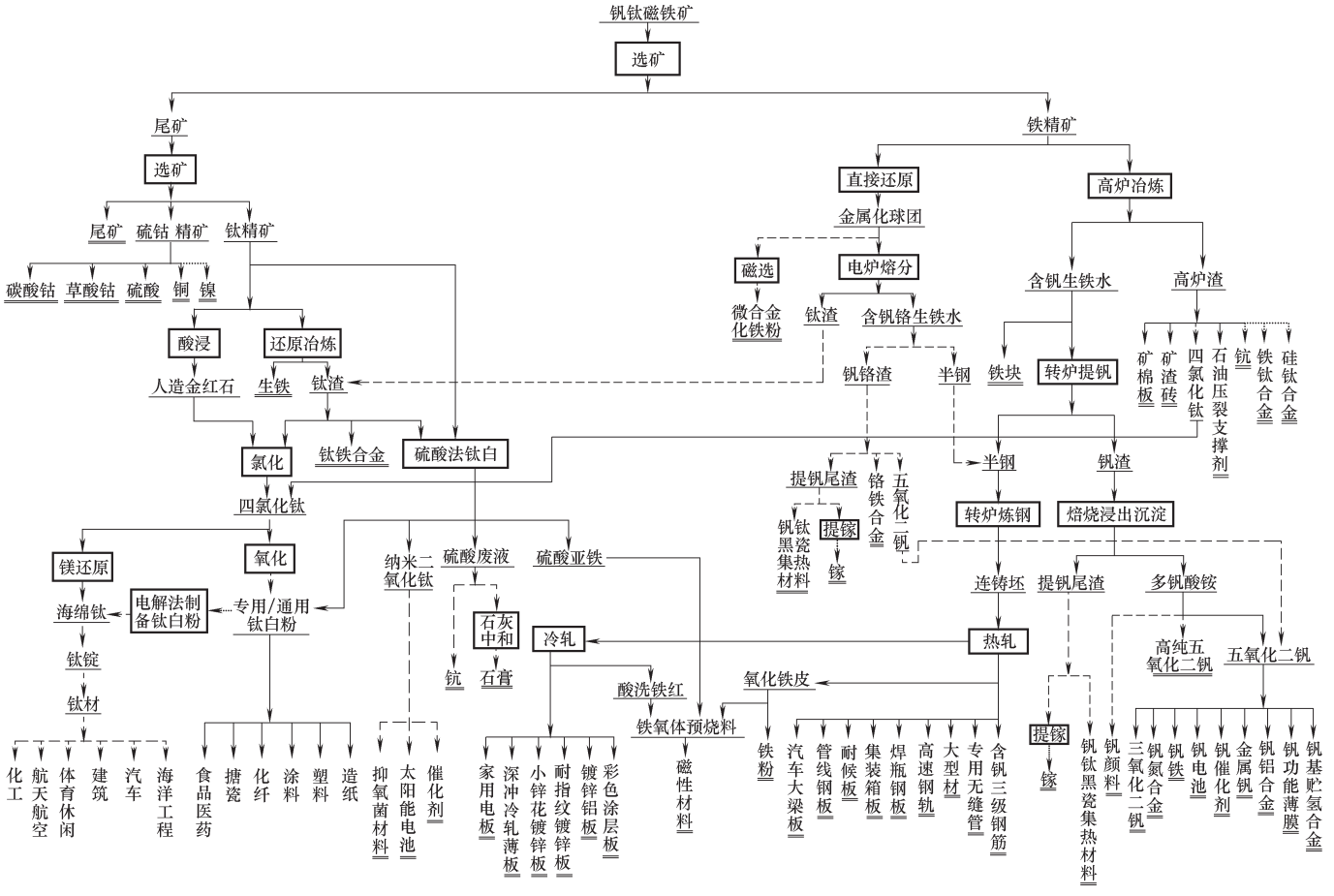
附表 2-7　攀枝花硫钴精矿主要化学成分

成分	Co	Ni	Cu	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MnO_2	Fe	S	TiO
比例(%)	0.210 ～ 2.103	0.18 ～ 4.305	0.11 ～ 1.37	4.05 ～ 7.11	2.10 ～ 3.10	0.76 ～ 1.28	0.033 ～ 0.091	46.84 ～ 48.82	26.10 ～ 30.79	～ 3.26

国内外对硫钴矿大多采用硫酸化焙烧—浸出—净化—钴镍分离湿法冶金工艺来提取钴、镍和铜的化合物，如碳酸钴、氯化钴、氧化钴、氢氧化钴、氢氧化镍等。其中的硫可作为制取硫酸的原料；硫钴精矿还可以作为搪瓷密着剂原料，比纯氧化钴镍搪瓷密着剂的成本低 40% 左右。

目前，对硫钴精矿进行的深度开发不足。

钒钛磁铁矿综合利用工艺流程见附图 2-5。



附图 2-5　钒钛磁铁矿综合利用工艺流程

2.2 我国主要其他含钒矿物资源及开发潜力分析

2.2.1 碳质页岩（石煤）资源及其开发利用概况

石煤是一种含碳少、发热值低的劣质无烟煤，又是一种低品位多金属共生矿。生成于古老地层中，由菌藻类等生物遗体在浅海、泻湖、海湾条件下经腐泥化作用和煤化作用转变而成。其外观像石头，肉眼不易与石灰岩或页岩相区别，是高灰分（一般大于 60%）、深变质的可燃有机矿物。

1. 石煤资源品质特性

石煤是我国一种独特的钒矿资源，其特点是高灰（灰渣含量在 65% ～ 80%）、高硫（2% ～ 5%）、低碳（10% ～ 25%）和低热值（2 520 ～ 10 500kJ/kg），主要赋存于中泥盆纪以前的古老地层中。

形成石煤的物质除泥、硅、钙质等无机盐成分外，有机质部分主要是藻菌类等低级生物、海绵及一些分类尚不明确的原始动植物，是一种在还原环境（条件）下形成的黑色可燃有机岩， 多属变质程度高的腐泥无烟煤，为浅海相沉积物。

干燥石煤的最高热值可达 21 000kJ/kg，通常石煤（干基）的主要成分为：有机质 30% ～ 90%（腐殖酸 10% ～ 60%），灰分 10% ～ 70%，氮、磷、钾含量较多，一般含氮 1% ～ 3%，氧化钾 0.1% ～ 2%，有时含油率可达 2% ～ 10%，沥青质高者可达 12%。

石煤中含有或富集了较多的伴生元素，如 Mo、V、Ni、U、Cu、Se 及贵金属等 60 余种。在某些层位中，如一种或几种伴生元素达到工业单独开采品位或边界品位，可作该种矿物资源单独开采，并通过冶炼回收其有价组分。

含钒石煤的物质组成复杂多变，钒的赋存状态和赋存价态变化多端，且分散细微，X 衍射一般很难清晰准确地辨明其赋存方式，选矿方法也不能予以富集。钒在石煤中的价态分析研究结果表明：石煤中的钒绝大部分以 V^{3+} 形态存在于含钒云母、钒云母、电气石、石榴石等硅酸盐矿物中，以类质同象形式部分取代硅氧四面体复网层和铝氧八面体单网层中的 $A1^{3+}$。石煤中的钒还可以形成钛钒石榴石、钙钒石榴石、变钒铀矿等矿物，亦可以金属有机络合物和钒叶啉的形态存在，有时也以络阴离子呈吸附形态作为混入物存在于氧化铁、黏土类矿物中。

石煤是一种低品位多金属矿石。品位较高有工业利用价值的有钒、钼、银、镓、铯等 20 多种，此外，还伴生铬、砷、汞、铅、镉等元素。

含碳量较高的优质石煤呈黑色，具有半亮光泽，杂质少，相对密度为

1.7 ～ 2.2kg/cm^3。含碳量较少的石煤呈偏灰色，夹杂有较多的黄铁矿、石英脉和磷钙质结核，相对密度 2.2 ～ 2.8kg/cm^3，发热量 3.5 ～ 10.5MJ/kg，是一种低热值燃料。热值偏高的石煤在改进燃烧技术后，可用作火力发电的燃料，也可用于烧制水泥、制造化肥，灰渣制碳化砖等。伴有生钒的石煤可提取五氧化二钒。

按结构、构造不同，石煤可分为块状石煤、粒状石煤、鳞片状石煤和粉状石煤。按石煤中矿物杂质的主次可分为硅质石煤、钙质石煤等。石煤可作燃料，燃烧后的炉渣可制成炭化砖、水泥等建筑材料，还可从石煤中提取钒、铀、钼、镍、铜、钴等金属元素。

中国含钒石煤矿经选矿并富集后的主要矿产品是钒精矿。

2. 石煤资源开发利用概况

（1）石煤的综合利用 目前，含钒石煤矿的综合利用主要在发电、提炼稀有金属、农肥和建筑材料等方面。在充分利用石煤低热值能源的同时，研究提取钒及其伴生元素，不但可以提高石煤的利用价值，还可为中国国民经济建设提供更多急需的金属材料。

1）作为燃料。石煤是有机碳与无机元素的混合体，具有一定的发热能力。但由于石煤碳含量低、灰分高， 给燃烧带来一定困难。石煤经过简单浮选后去掉大部分灰分，可作无烟煤用，也可加少量粘结剂制成型煤供民用或工业锅炉用。随着工艺的改进和技术难关的突破，沸腾炉、循环流化床锅炉燃烧石煤发电已经投入商业开发，因此石煤作为一种能源不仅可在一般工业锅炉中使用，还可用于电厂发电。

石煤在燃烧过程中产生大量大气污染物，如 HCl、Cl_2、HF、SO_2 等，危害严重。因此，在要做好烟尘的回收防止环境污染的同时，也要注意二氧化硫的充分利用，如可以利用其制硫酸，或者制焦亚硫酸钠（目前该技术已经相当成熟）。

2）作为能源矿产用于发电，并从中提取钼、镍、钒等金属。结合我国石煤储量大、分布相对集中的特点，可以考虑将石煤作为能源矿产用于发电，并综合回收钼、镍、钒等有价金属，实现资源综合利用。石煤发电可以结合浮选技术，当无机杂质含量高时应先分别富集。石煤发电项目及废渣综合提炼精钼、镍、钒等产品，经济效益显著。

3）应用于建材工业。石煤结构较致密，多呈片状，层间吸附水少、黏性小。石煤的颗粒组成大多为粘粒级（小于 0.05mm 颗粒占 40%），故易磨性和易烧性好。

可以利用石煤渣生产碳化砖及其他碳化制品。由于石煤渣中含有一定数量的伴生矿物和制水泥的原料，可用锅炉燃烧后的石煤渣为主要原料配以适当比例的石灰、石膏，用蒸汽养护，再配料、破碎、磨细即得成品水泥。

4）石煤渣作助滤剂。将石煤渣煅烧、活化、粉碎后可代替硅藻土做助滤剂，用于净化啤酒、菜油、酱油以及水处理等。

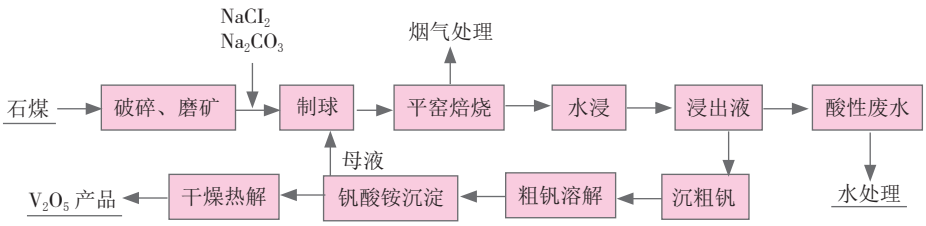
5）作为肥料。石煤是古代低等植物沉积而成的一种灰分含量高、热值低的燃料，它含有十几种农作物必需的营养元素，如磷、钾、硅、钙、镁、硫、铁、硒、锰、硼、锌及稀土等。石煤经高温燃烧后，也可将这些元素的有效成分保留在烧渣中。用石煤渣作肥料可改善农作物的生育性状、提高产量，在酸性或缺磷少钾土壤中施用，增产幅度更大。将石煤渣球磨成粒度为 120 ～ 180 目的石煤渣粉，作基肥或追肥施用即可。把石煤渣粉与有机肥料混合堆沤，石煤渣中所含的硅、钙、磷、钾等元素不但能改善微生物繁殖环境，还能使石煤渣中的难溶性养分被有机酸活化，使其各种养分协调、互补。比如湖南石门磷肥厂利用石煤中含磷、钾高，且含有碳、钙、镁等元素，用石煤代替卵石和焦炭烧制转镁磷肥获得成功。湖南益阳、常德电厂分别将粉煤炉改成沸腾锅炉全烧石煤发电成功，包括利用石煤烧制成建筑材料以及利用石煤生产肥料。

（2）从石煤中提钒工艺现状　从石煤中提钒是目前最主要和重要的石煤利用工艺。我国从石煤中提钒源于 20 世纪 70 年代，其中南方各省直接从石煤中提取高品位钒产品，远销美、日、德和比利时等国，已取得较大成绩。

石煤提钒工艺过程一般分为以下步骤：焙烧—浸出—除杂、富集—沉钒和脱氨。不同提钒工艺的主要差别在于焙烧工艺和浸出工艺。焙烧工艺主要有钠化焙烧、钙化焙烧、氧化焙烧，浸出工艺则大致可分为碱浸法、酸浸法和焙烧浸出法三类，各种方法均有其优缺点。下面分别介绍各种提钒工艺。

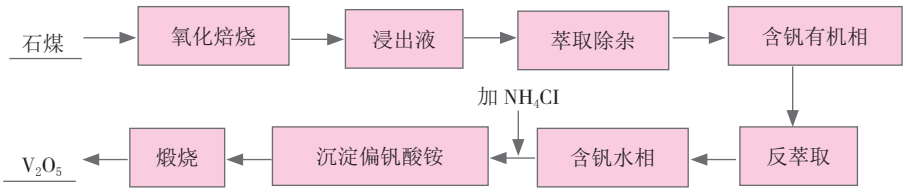
20 世纪 70 年代以来，我国南方各省市冶金、地质、化工和煤炭部门有关科研机构、高校和生产厂矿广泛协作，石煤提钒工作取得较大发展，以提高 V_2O_5 总回收率、简化流程、降低生成成本、减少“三废” 对环境污染为目标，提出了多种提钒流程工艺，其中有代表性的有以下几种。

钠盐焙烧—水浸—酸沉粗钒—碱溶铵盐沉钒—热解脱氨制取粗钒工艺。该工艺是我国早期石煤提钒主要方法，到 20 世纪 80 年代，工艺中的两步沉钒有了改进，采用钠化焙烧—水浸—离子交换—氨水沉钒工艺。钠盐焙烧设备采用平窑或沸腾炉（附图 2-6）。



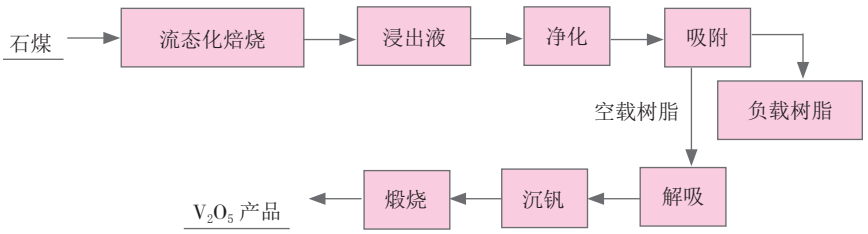
附图 2-6　传统石煤提钒工艺原则流程

无盐焙烧—酸浸—溶剂萃取工艺。该工艺是湖南省煤科所与湘西双溪煤矿钒厂共同开发的。由于不加钠盐，生产成本降低 20% ～ 25%，同时避免了烟气对环境的污染，且含钒废水的处理量有所减少，如附图 2-7 所示。



附图 2-7　无盐焙烧—酸浸—溶剂萃取工艺

流态化焙烧—酸浸—离子交换工艺。由湖南省煤科所与长沙有色冶金设计院共同开发，并已在湖北某钒厂应用，钒回收率达 65% 以上，工艺流程如附图 2-8 所示。



附图 2-8　流态化焙烧—酸浸—离子交换工艺流程

纯湿法提钒工艺。由核工业北京化工冶金研究院开发，主要工艺流程为：原煤破磨—两段逆流酸浸—溶剂萃取—沉钒—热解制精钒。其工艺于 1996 年在西北地区建成年产 6 601t V_2O_5 的生产厂，钒回收率达 75%，产品品位超过 98%，生产过程无污染且实现了自动化操作。但未见后续报道，说明全湿法提钒工艺可能还存在某些技术问题。

除了上述四种石煤提钒工艺流程外，一些科研生产部门还相继研究过石煤氧

化焙烧—碱浸—钙化焙烧—碳酸化浸出以及石煤高湿加压氧化浸出提钒等提钒方法，但均未见工业实践报道。

从上述多种石煤提钒工艺流程及其开发过程中可初步归纳出以下特点：

第一，石煤提钒工艺已从传统的钠化焙烧逐步向无钠焙烧的方向发展，这是国家环保政策法规要求所决定的。

第二，含钒石煤的多样性和复杂性可能是造成提钒工艺非单一性的主要原因之一。

第三，针对我国含钒石煤资源特点及生产实践中发现的问题，综合利用石煤资源应着力解决四个主要技术问题。一是提高石煤的钒品位。初步推算，对于年生产能力 500t 的钒厂，矿石钒品位提高 0.1% 则产量提高 100t，吨钒生产成本降低 1 000 元。二是提升石煤焙烧浸出技术和装备水平，提高 V_2O_5 回收率，降低生产成本。三是着力解决环境污染问题，其中废水处理和固体废渣利用是重要内容。四是针对不同发热量和含钒量的石煤，分别开展以能源开发为主线和以钒矿资源利用为主线的新工艺流程研究，建立示范生产基地。

3. 含钒石煤资源潜力分析

除我国外，世界上其他国家在工业上开采利用含钒石煤尚不多见，因此石煤是我国的特色含钒原料。在目前技术下，五氧化二钒品位达到 0.8% 以上的石煤才具有工业开采价值，约占石煤总储量的 20% ～ 30%，其可开采储量大于钒钛磁铁矿，因此，以石煤为原料生产钒制品在我国具有良好的发展前景。

石煤中还含有大量的二氧化硅和碳元素，以及含有钒、钾、钼、铀等多种伴生金属元素。

2.2.2 其他含钒矿物资源简介

1. 钒云母

钒云母主要产于湖北省，赋存于含有机炭质较高的炭质板岩中，岩石中存在大量煤岩组分，与铬钒水云母、铬钒白云母等共生，结构式为 $K(V, Al, Mg)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$，Y 组离子以钒和铝为主，类质同象混入物有镁、$Fe^{3+}$、$Fe^{2+}$、铬等。晶体结构为单斜晶系，解理｛001｝极完全。钒云母可作为提取钒的矿物原料。

2. 含钒有机基原料矿

钒与其他有机化合物形成络合物，如高硫石油、沥青质岩等。通常中东原油中 V_2O_5 含量为（20 ～ 150）g/t，有的高达（300 ～ 400）g/t。因此，这些有机燃油的渣、灰及脱硫用的废催化剂等均含有大量的钒，有的还含有钼、镍等二次

资源，可作为提钒的重要原料。

3. 含钒复合多金属矿

许多复合多金属矿如钒铅矿、钒铅锌矿、钾钒铀矿等除含有铀、镭、铜、铅、锌、锰、钼等外，也含有钒。含钒铝土矿也属于这一类矿床。钾钒铀矿是一种钾铀的钒酸络盐，它的化学式为 $K_2O \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot （1 \sim 3）H_2O$，呈浅黄色或浅绿黄色，矿石含 V_2O_5 为 1.5% ～ 2.0%。美国科罗拉多高原等地是这种矿物的主要产地，在提铀时可制得 V_2O_5。

2.3 主要其他含钛矿物资源及开发潜力分析

2.3.1 钛铁矿砂矿及其资源潜力分析

我国钛铁矿砂矿资源主要分布在广东、广西、海南和云南等省区，矿点比较分散，尚未发现大型矿床。

我国钛铁矿砂矿的品位与国外相比较低，大部分精矿中 TiO_2 含量 48% ～ 52%，只在广西部分地区有 TiO_2 含量 54% ～ 60% 的高品位优质钛铁矿砂矿。全国共有钛铁矿砂矿区 66 处，其中大型 9 处、中型 15 处、小型 42 处，其矿床特点是矿点比较分散、规模小、品位低。

海南和云南的钛铁矿砂矿储量较大。海南省钛铁砂矿共有 20 处，主要分布在东南沿海一带，北起文昌经琼海、万宁、陵水直到南部三亚市，沿海岸线断续分布，是我国目前重要的钛矿产地。钛铁矿是云南省黑色资源中除铁、锰外居第 3 位的重要矿种，主要分布在禄劝、武定、富民、禄丰、保山板桥、西双版纳的勐海及滇南的石屏、建水、华宁、蒙自、富宁等地区。云南省已探明的钛铁矿床有 30 个，其中大型 15 个、中型 5 个、小型 10 个，探获钛铁矿储量 5 561 万 t，为优质钛铁矿砂矿。其矿床特点是储量大、品位高、矿物组合简单、分选性能良好，钛精矿中钙镁杂质低、品质好，是生产海绵钛的优质原料。

广东省有钛铁砂矿 8 处，主要分布在湛江、汕头、水东、徐闻。广西钛铁矿砂矿共 13 处，大都属于风化矿，原生矿较少。其中梧州地区钛铁矿主要分布在藤县、苓溪、苍梧等地，已探明 TiO_2 储量约 600 万 t，含矿率 20 ～ 40kg/m^3，最高达 160kg/m^3；玉林地区钛铁矿主要分布在陆川、博白、贵县、玉林等地，TiO_2 储量在 500 万 t 以上，含矿率 16 ～ 25kg/m^3，最高达 90kg/m^3；钦州地区钛铁矿主要分布在钦州、防城、合浦、灵山以及北海市、北部湾一带，估计 TiO2 储量在 500 万 t 以上，已探明储量 100 万 t 以上。此外在大新、百色、那坡等地也发

现有钛铁矿。

此外，在江苏省邳州市燕子埠和铜山县汴塘乡马头山境内又发现了两处大型钛铁砂矿床，有埋藏浅、厚度大、品位高、矿化均匀等特点，开发利用前景极好。

2.3.2 原生金红石矿及其资源潜力分析

到目前为止，我国已发现金红石矿床、矿化点 88 处，分布于 17 个省、自治区，以湖北、河南、陕西、江苏、山西及山东为主，占全国总储量的 96%。经过勘查的有 50 处，探明储量约 1 530 万 t(金红石 TiO_2)。其中大型矿床 9 个，储量约 1 400 万 t，占总储量的 91%；中型矿床 10 个，储量约 84 万 t，占总储量的 5.4%。

我国已探明的主要金红石矿主要集中在华北地区，包括陕西户县商南、安康、平利、河南西峡、方城、新县，安徽西部和湖北枣阳等地的有关矿床（点）。湖北省枣阳市大阜山金红石矿和山西省代县碾子沟金红石矿，是目前国内已发现的规模最大的两个金红石矿，约占全国金红石岩矿资源总储量的 97%。

现在我国已探明的主要金红石矿情况如下：

（1）湖北枣阳大阜山金红石矿　目前国内地质工作程度最高的金红石矿，此矿床既有原生矿又有砂矿。枣阳大阜山金红石矿金红石储量高达 2.49 亿 t，其中 TiO_2 含量达到 572 万 t，是我国目前探明储量最大的原生金红石矿床之一。

（2）山西省代县金红石矿　我国金红石矿的主要产区，矿石储量居全国第二位。代县金红石矿主要由义成沟、张山沟、碾子沟、羊廷寺和刘家沟 5 个矿区组成，初步查明代县金红石矿储量约 3 亿 t(金属储量 600 多万 t)。山西代县金红石矿原矿品位较高，金红石晶体含 TiO_2 高达 97% 以上，该矿石易采、易选、储量丰富、金红石纯度高、杂质少、开发利用条件较好。

（3）河南省西峡、方城、新县、泌阳金红石矿带　西峡县金红石矿位于西峡县重阳乡，目前探明 C 级以上金红石储量达 19 万 t，远景储量在 500 万 t 以上，金红石矿平均品位为 2% ～ 4.5%，最高品位可达 6.5%。方城县金红石矿共有 5 个矿段，其中 4 个在方城县辖区，1 个在南召县辖区，已详查 TiO_2 储量 397 万 t，矿石品位 TiO_2 为 2% ～ 5%，平均品位为 2.22%。新县金红石矿已探明储量 TiO_2 为 81.57 万 t，其平均品位为 1.65%。泌阳金红石矿储量为 34 万 t，C 级以上金红石储量为 41 万 t。

2.3.3 金红石砂矿及其资源潜力分析

金红石砂矿包括海滨砂矿和残坡积风化壳型金红石矿。中国金红石砂矿保有储量主要分布在河南、湖北、山东、湖南、陕西等 5 个省区内，其次分布在广东、广西、海南，共有 27 个矿区，其中大型矿区 2 处、中型 4 处，其余均为小型矿区。河南省金红石砂矿表内储量 218.45 万 t，占全国同类储量的 85%；山东、湖北、湖南三省表内储量共计 33.91 万 t，占 13.2%。

海滨砂矿型金红石矿主要分布在海南、广东、广西、福建等省。海南有 28 个锆英石矿中伴生有金红石矿，平均金红石含量为 l ～ 2kg/m^3，总储量 1.9 万 t。

风化壳型金红石矿主要分布于河南、山东、湖北、湖南、陕西、福建、安徽、江苏等省区。河南方城柏树岗金红石矿规模最大，金红石 TiO_2 品位为 1.88%；规模次之为陕西省安康大河熊山沟金红石矿和山东莱西市南墅与石墨矿伴生的金红石矿。

风化壳型金红石矿矿床虽然规模较小、储量低，但由于具有易采、易碎、易选等特点，目前是中国金红石矿开发的主要矿石类型。

参考文献

[1] 江衍镇．我国的铋资源及其综合利用问题 [J]. 矿产综合利用，1983（1）：30—35.

[2]《中国矿物志》编写组．中国矿物志 [M]. 北京：地质出版社，2000.

[3] 吴良士，白鸽，袁忠信．实用天然产物手册 矿物与岩石 [M]. 北京：化学工业出版社，2005.

[4] 沈永淦，陈小磊．冶金矿产原料 [M]. 北京：化学工业出版社，2012.

[5] 中国地质矿产信息研究院．中国矿产 [M]. 北京：中国建材工业出版社，1993.

[6] 何周虎，李时谦，胡志科．关于铋矿床工业指标的讨论 [J]. 华南地质与矿产，2004（2）：32—34.

[7] 钱汉东，陈武，谢家东，等．碲矿物综述 [J]. 高校地质学报，2000（2）：178—187.

[8] 陈毓川，毛景文，骆耀南，等．四川大水沟碲（金）矿床地质和地球化学 [M]. 北京：原子能出版社 .1996.

[9] 黄蕴慧，等．中国矿物志 第 1 卷 自然元素单质及其互化物矿物 [M]. 北京：地质出版社，2000.

[10] 蔡长金，陆荣军，宋湘荣．中国金矿物志 [M]. 北京：冶金工业出版社，1994.

[11] 中国地质矿产信息研究院．中国矿产 [M]. 北京：中国建材工业出版社，1993.

[12] 银剑钊，陈毓州，周剑雄，等．全球碲矿资源若干问题综述——兼述中国四川石

棉县大水沟独立碲矿床的发现[J]. 河北地质学院学报，1995（4）：348—354.
[13]王成彦，邱定蕃，江培海．国内铋湿法冶金技术[J]. 有色金属，2001（4）：15—18.
[14]邱定蕃．矿浆电解[M]. 北京：冶金工业出版社，1999.
[15]郑雅杰，孙召明．铜阳极泥中回收碲及其新材料制备技术进展[J]. 稀有金属，2011（4）：593—599.
[16]王淑玲．铋：被动地位变主动地位难？[J]. 中国有色金属，2010（6）：23—24.
[17]李谦锋，刘麦．走进铋时代[J]. 中国金属通报，2013（40）：28—30.
[18]江涛宏，王志恒．铋业新格局[J]. 中国有色金属，2014（12）：48—49.
[19]J M Rajwade，K M Paknikar. Bioreduction of tellurite to elemental tellurium by Pseudomonas mendocina MCMB—180 and its practical application[J]. Hydrometallurgy，2003，71：243—248.
[20]王晓民，孙竹贤．硒碲的生产现状与发展前景[J]. 中国有色冶金，2009(1)：38—43.
[21]杨绍利．钒钛材料[M]. 北京：冶金工业出版社，2007.
[22]王喜庆．钒钛磁铁矿高炉冶炼[M]. 北京：冶金工业出版社，1994.
[23]杨绍利．钒钛磁铁矿非高炉冶炼技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.
[24]杜鹤桂，等．高炉冶炼钒钛磁铁矿原理[M]. 北京：科学出版社，1996.
[25]于新光，等．稀有贵金属矿产原料：天然矿物原料丛书[M]. 北京：化学工业出版社，2013.
[26]邹建新，李亮．钒钛产品生产工艺与设备[M]. 北京：化学工业出版社，2014.
[27]赵海燕．钒资源利用概况及我国钒市场需求分析[J]. 矿产保护与利用，2014（2）：54—58.
[28]刘元海，王玖斌，陈平，等．支持攀西战略资源创新开发试验区发展的财税政策研究[J]. 经济研究参考，2014（21）：3—37.
[29]李兴华．攀枝花钒钛磁铁矿综合利用技术路线图研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2011.
[30]潘廷祥．“钛”景耀眼 “钛”途艰难[N]. 中国有色金属报，2014—01—02（5）.
[31]罗淙．国家战略 资源驱动 凉山发展[N]. 凉山日报（汉），2014—07—21（A09）.
[32]谭其尤，陈波，张裕书，等．攀西地区钒钛磁铁矿资源特点与综合回收利用现状[J]. 矿产综合利用，2011（6）：6—10.
[33]100° 文化工作室．你必须知道的2500个地理常识[M]. 重庆：重庆大学出版社，2012.
[34]何桂珍，都兴红，曲赫威，等．非高炉冶炼技术的发展现状与展望[J]. 矿产综合利用，2014（3）：1—7.

[35] 严嘉荣．高炉冶炼钒钛磁铁矿过程中钒还原特征研究[D]．重庆：重庆大学，2013.
[36] 蒋述兴，王锋，胡晓林．石煤的综合利用[J]．佛山陶瓷，2010（9）：43—44.
[37] 邓杰，张渊，刘飞燕．攀西钒钛磁铁矿中硫钴粗精矿综合利用研究[J]．现代矿业，2014（1）：41—44.
[18] 潘自维，郑诗礼，王中行，等．亚熔盐法高铬钒渣钒铬高效同步提取工艺研究[J]．钢铁钒钛，2014（2）：1—8.
[39] 武宝新，王晖，符剑刚，等．湖南某石煤钒矿选煤选钒的探索试验[J]．稀有金属与硬质合金，2014（3）：1—6.
[40] 储少军，章俊．石煤资源利用技术的现状及展望[J]．铁合金，2014（3）：60—64.
[41] 刘玉芹，丁浩，谢迪．中国钛资源与海绵钛加工环境效应[J]．地学前缘，2014(5)：281—293.
[42] 解宗妍，周进生，宋伟，等．承德资源经济发展转型模式研究[J]．中国矿业，2014（8）：71—74.
[43] 黄丹．钒钛磁铁矿综合利用新流程及其比较研究[D]．长沙：中南大学，2012.
[44] 张建廷．红格铁矿铬的赋存、分布与回收利用[J]．四川有色金属，2005(1)：1—4.
[45] 孙朝晖．钒新技术及钒产业发展前景分析[J]．钢铁钒钛，2012（1）：1—7.
[46] 李晓琴．攀枝花地区矿产综合利用现状与发展探讨[J]．中国资源综合利用，2013（8）：35—38.
[47] 胡途．钒钛磁铁精矿转底炉多层球还原基础研究[D]．重庆：重庆大学，2013.
[48] 何真毅．四川攀西地区重要共伴生矿产特征及综合利用研究[J]．四川地质学报，2009（2）：144—148.
[49] 朱俊士．钒钛磁铁矿选矿及综合利用[J]．金属矿山，2000（1）：1—5，11.
[50] 张展雷，于恒，宋志芳，等．钒钛磁铁精矿复合造块试验研究[J]．烧结球团，2014（4）：1—5.
[51] 徐丽君，李亮，陈六限，等．攀西地区钒钛磁铁矿综合回收利用现状及发展方向[J]．四川有色金属，2011（1）：1—5.
[52] 华一新．有色冶金概论[M]．北京：冶金工业出版社，2007.
[53] 熊威娜．钒矿开发对水环境的影响及其治理[J]．能源环境保护，2008(6)：39—41.
[54] 大连海关归类分中心．金属矿产品归类指南[M]．北京：中国海关出版社，2007.
[55] 吴贤，张健．中国钛资源分布及特点[J]．钛工业进展，2006，23（6）：8—12.

附表 1-3　伴生铋的矿床（石）主成分

序号	矿床类型	产地	主要矿物	铋含量（%）	含铋矿物名称
1	石英脉黑钨矿床	江西赣南	黑钨矿、辉铋矿	0.02 ～ 0.2	辉铋矿
2	石英脉黑钨矿床	江西赣江、福建、广西	黑钨矿、辉钼矿、硫铁矿	0.01 ～ 0.3	硫铋碲矿
3	石英脉黑钨矿床	江西	黑钨矿、辉钼矿、硫铁矿		硫铋碲矿
4	石英脉黑钨矿床	甘肃、湖南、福建	黑钨矿、黄铜矿、黄铁矿、石英、辉铋矿	微量	辉铜铋矿
5	含钨石英脉	江西赣县赖坑	黑钨矿、黄铁矿、辉铋矿、辉钼矿	0.8 ～ 1.0	赣南矿
6	石英脉钨矿床	江西盘古山	钨铋矿、石英	品位低	钨铋矿
7	钨铋矿床	云南、江西赣南	泡铋矿、氯铋矿、钒铋矿	0.01 ～ 0.1	铋华
8	钨铋矿床	赣南、广东、湖南	泡铋矿	—	泡铋矿
9	金矿	陕西洛南	铬铋矿	—	铬铋矿
10	钨锡矿	云南个旧、江西大庾漂塘大龙山	毒砂、辉铋矿、黑钨矿、辉钼矿、锡石、黄玉	云南：0.05 ～ 0.06 江西大龙山：30 ～ 40	自然铋
11	钨锡矿－矽卡岩型白钨矿床	湖南郴州柿竹园	辉铋矿、黑钨矿	0.13	辉铋矿
12	钨锡矿	广东怀集	黄铜矿、辉铋矿、黄铁矿、磁铁矿和锡石	0.01 ～ 0.1	辉铋矿
13	石英脉状矿床	江西黑铋矿	辉碲铋矿、辉铅铋矿	0.01	硫铜铋矿
14	金石英矿脉、砂金矿	四川石棉、陕西黄龙、北京得田沟	黄铁矿、闪锌矿、赤铁矿	—	辉碲铋矿
15	残坡积沙锡床	尚未利用	锡石、铁铅等矿物	≤ 0.06	—

及矿物主要性质、资源品质情况

含铋矿物主要性质					资源品质
化学组成	晶系	比重	摩氏硬度	颜色	
Bi_2S_3	六方	9.7～9.83	2.0～2.5	银白浅红	回收铋的主要对象
A:Bi.TeS B:BiTe.S	—	2	8.1～8.3	钢灰铁黑	
C:Bi.TeS_3	六方	7.2～7.6	1.5～2.0	锡白浅灰	
$CuBiS_2$	—	6.44～6.47	2～3.5	浅蓝黑	甘肃铋含量低，选矿未能回收；湖南宝山铜矿铋品位较高，可综合回收；福建连城铜钼矿铋含量低
BiW	等轴	8.928	1.35～1.53	棕至黑色	可选出 Bi ≥ 70% 的铋精矿
BiW	四方	6.8～7.5	3.0～3.5	浅白黄绿黄灰	老矿山、易选，品位低
Bi_2O_3	单斜	4.36	1.0～2.0	淡黄橘黄	云南铋华品位低、多金属共生
$Bi_2O_2CO_3$	四方	2.5～3.5	—	黄色	铋矿物的蚀变产物
$Bi1_6CrO_{27}$	四方	9.8	3～4	橘黄黄棕	铋在自然金和碲金矿中含量较高，铬秘矿可作为找金的重要指示矿物，同时对金的来源、金的富集有重要意义
Bi	六方	9.7～9.83	2.0～2.5	银白浅红	云南品位低，组分复杂；江西大龙山高达 30%～40%
Bi_2S_3	六方	9.7～9.83	2.0～2.5	银白浅红	铋储量大（26.58 万 t），品位高，颗粒细，硅高，难选
Bi_2S_3	六方	9.7～9.83	2.0～2.5	银白浅红	浮选—重选—磁选联合流程，可综合回收铜、铋、铁、硫、锡等多种有价元素
$CuBiS_2$	斜方	6.3～6.5	2.0	锡白	铜铋混合浮选—铜铋分离浮选工艺和新型有机抑制剂 XTL-3 处理，可实现铜和铋的高效无氰分离
BiTe	三方	7.81～8.05	1.5～2.0	铅灰	含杂质元素铁、铅、硒、锑、金和银，其中硒、金和银含量分别达 1 600～2 600g/t，1.4～10.7g/t 和 2 300～3 400g/t
—	—	—	—	—	—

附表 1-4　含碲的矿床(石)主成分

序号	矿物类型	化学式	化学成分	晶系	硬度	相对密度	颜色
1	自然碲	Te		三方	2.0～2.5	6.1～6.3	锡白
2	板碲金银矿	$AuAgTe_2$	Au 40.1% Ag 13.0% Te 46.9%		—	—	—
3	亮碲金矿	$(Au,Sb)_2Te_3$	Au 54.18% Te 45.82%	三斜	—	—	—
4	碲金矿	$AuTe_2$	Au 43.59% Te 56.41%	单斜	2.5～3.0	9.1～9.4	草黄 银白
5	铜质碲金矿	$AuCuTe_4$	Au 27.47% Cu 3.81% Te 63.94%	斜方	2.58	—	—
6	辉碲铋矿	Bi_2Te_2S	Bi 51.99% Te 47.89% S 0.12%	三方	1.5～2.2	7.2～7.3	淡钢 灰色
7	碲银矿	Ag_2Te	Ag 62.86% Te 37.14%	单斜或 等轴	2～3	8.24～8.45	铅灰
8	碲铋矿	Bi_2Te_3	Bi 59.27% Te 36.18% S 4.55%	三方	1.5～2	7.81	铅灰
9	碲铜矿	Cu_7Te_5	Cu 40.74% Te 59.21%	四方	3.5	7.54	紫红色
10	碲铅矿	PbTe	Pb 61.91% Te 38.09%	等轴	3	8.19	锡白
11	针碲金银矿	$AgAuTe_4$	Au 25.45% Ag 13.04% Te 60.61%	单斜	1.5～2.0	8.17	银白色
12	碲硫铋矿	Bi_2TeS_2		六方	—	—	—
13	碲金银矿	Ag_3AuTe_2	Ag 33.2% Au 20.94% Te 31.63%	—	—	—	钢灰 铁灰
14	叶碲铋矿	Bi_4Te_3	—	—	—	—	—

及矿物主要性质、资源品质情况

产地	共（伴）生物	资源品质
河南小秦岭、陕西洛南及四川黄金坪	金和银的碲化物	—
湖南大坊	黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和毒砂	—
河北东坪矿区和新疆多拉纳萨依金矿	黄铁矿褐铁矿、赤铁矿和自然金	—
吉林延边刺猬沟、河北东坪、冀东峪耳崖、河北省唐山市迁西县金厂峪、陕西双王以及河南文峪、杨寨峪、银洞坡、上宫等地	金银矿、黄铁矿、黄铜矿、碲铋矿	提炼金的矿物
陕西驾鹿	自然金、自然碲、针碲金银矿	可以与金、碲矿物一起被工业利用
四川石棉大水沟	自然金、铋的碲化物、自然铋、碲铅矿	全球第一例独立碲矿床，碲平均品位6% ～ 7%。
广西大厂矿田、吉林兴隆	常与其他的碲化物共生，碲金银矿、白碲金银矿、自然金	—
—	自然金、碲铅矿、辉铋矿、碲金银矿、亮碲矿、自然铋	—
广东曲江大宝山、江西城门、甘肃金川白家嘴子	黄铜矿	三者储量之和为全国伴生碲储量的 94%
—	碲银矿、碲金银矿、自然金、黄铁矿、毒砂	风化后可形成氧碲铅矿
江苏金驹山、陕西驾鹿、内蒙古哈达门沟	银的碲化物、白碲金银矿、碲铅矿，有时自然碲	单独利用或与其他金矿物一起被利用
福建马坑	辉铋矿、辉碲铋矿、黄铜矿、方解石	含碲量低
黑龙江省三道湾子金矿、江苏金驹山、赣南银坑山、山东归来庄和陕西驾鹿	针碲金银矿、碲金银矿、碲银矿、碲金矿	—
—	与金银矿物紧密共生	2002 年首次发现

附表 1-5　国内铋湿法冶金

序号	湿法冶金工艺		工艺流程或技术关键	主要反应
1	三氯化铁浸出法	三氯化铁浸出－铁粉置换法	浸出—还原—铁粉置换—碱性熔炼—火法精炼—精铋	$Bi+3FeCl_3=BiCl_3+3FeCl_2$ $Bi_2S_3+6FeCl_3=2BiCl_3+6FeCl_2+3S$ $Bi_2O_3+6HCl=2BiCl_3+3H_2O$
2		三氯化铁浸出－隔膜电积法	控制电极电位和溶液透过隔膜的速度，使铋在阴极还原	铋在阴极还原 $Bi^{3+}+3e=Bi$， 铁在阳极氧化：$Fe^{2+}-e=Fe^{3+}$
3		三氯化铁浸出－水解沉铋法	pH1～2 弱酸性溶液中水解得氯氧铋，制取氯氧铋精矿	$BiCl_3+H_2O=BiOCl\downarrow+2HCl$
4	盐酸－亚硝酸浸出法		盐酸浸出 Bi_2O_3，亚硝酸浸出 Bi_2S_3	$Bi_2O_3+6HCl=2BiCl_3+3H_2O$ $Bi_2S_3+6HCl+24HNO_2=2BiCl_3+3H_2SO_4+24NO+12H_2O$
5	氯气选择性浸出		控制溶液电位，氯气选择性浸出硫化铋矿	$Bi_2S_3+3Cl_2=2BiCl_3+3S$
6	新氯化水解法		硫化铋矿—高浓度氯化浸出—浸出液还原除铅—中和水解—氯氧铋精矿—浸出、净化—纯氯化铋	$BiCl_3+H_2O=BiOCl\downarrow+2HCl$
7	矿浆电解法		50～60℃，氯盐低酸体系浆化，电解槽的阳极区电解矿浆，铋精矿在被氧化浸出的同时，金属铋在阴极被还原析出，实现了金属铋的一步提取	阳极主反应： $Bi_2S_3+6HCl=2BiCl_3+3H_2S$ $Bi_2S_3+6Fe^{3+}=2Bi^{3+}+6Fe^{2+}+3S$ 阴极主反应： $Bi^{3+}+3e=Bi$，$Fe^{3+}+e=Fe^{2+}$

工艺对比

工艺特点	工艺不足	成熟程度
铋浸出率高，综合利用好，污染较小，是铋资源综合利用的有效方法	材料消耗较高，废液排放量大	比较成熟
工艺流程简单	铁离子浓度高可部分透过隔膜，电流效率低	不够成熟
工艺流程简单	酸耗高、水耗大、试剂耗量大、铋回收率低（60%）、废水排放量大	有工业试验，无工业应用
可处理难选含铋硫化矿精矿	消耗试剂种类多	半工业试验
铋的浸出率较高	氯气消耗量较大，污染和腐蚀问题严重，设备材质和密封要求更高	与三氯化铁浸出法相比，无明显经济优越性
铋浸出率大于99%，铁在溶液中可循环，浸出剂可氧化再生	浸出温度高（95～105℃），元素硫氧化严重，杂质元素浸出率也较高，氧化剂的耗量较大，设备腐蚀严重，废液排放量大	无工业应用
同时完成铋矿石的氧化浸出和铋的电积还原。流程简化，金属回收率高，能耗低，环境友好，投资省		工艺成熟，已工业应用

附表 1-6　国内碲火法冶金

序号	工艺名称	工艺流程或技术关键
1	纯碱焙烧法	碳酸钠、水与铜阳极泥充分混合，制成浓膏，530 ～ 650 ℃焙烧，将碲转化为 Na_2TeO_4，磨细水浸，碲酸钠富集在渣中，稀硫酸浸渣，碲酸钠转化为可溶解的碲酸，用盐酸和 SO_2 将碲酸还原为碲。也可在一定酸度下，用亚硫酸钠将碲酸还原成 TeO_2；或电解碲酸钠可获得碲
2	硫酸化焙烧法	将阳极泥配以料重 80% ～ 110% 的硫酸，在 350 ～ 530℃温度下焙烧。在焙烧过程中，含硒、碲阳极泥中的硒反应生成易挥发的 SeO_2 而进入烟气，用水吸收生成 H_2SeO_3，随后被焙烧过程产生的 SO_2 还原生成元素硒而沉淀析出；碲转变为 TeO_2 和 $TeO \cdot SO_4$ 等留在焙砂中，用盐酸浸出回收碲
3	氧化焙烧法	低温下阳极泥经氧化焙烧，铜、镍和碲转变为相应的氧化物，而硒以二氧化硒的形式挥发

工艺对比

主要反应	工艺特点	工艺不足	成熟程度
$Na_2TeO_4+H_2SO_4=H_2TeO_4+Na_2SO_4$ $H_2TeO_4+2HCl=H_2TeO_3+H_2O+Cl_2\uparrow$ $H_2TeO_3+H_2O+2SO_2=2H_2SO_4+Te\downarrow$ $H_2TeO_4+Na_2SO_3=TeO_2\downarrow+Na_2SO_4+H_2O$ $Na_2TeO_3+H_2O=Te+2NaOH+O_2\uparrow$	处理量大，有利于回收贵金属，在流程的第一步就能将硒、碲与贵金属分离，也不存在设备腐蚀问题	流程长，操作复杂，污染较大，回收率低	无工业应用
$Se+2H_2SO_4=SeO_2+2SO_2\uparrow+2H_2O$ $Ag_2Se+4H_2SO_4=Ag_2SO_4+SeO_2+3SO_2\uparrow+4H_2O$ $Cu_2Te+6H_2SO_4=2CuSO_4+TeO_2+4SO_2\uparrow+6H_2O$ $SeO_2+2SO_2+2H_2O=Se+2H_2SO_4$	硒的回收率高，同时回收碲；不需另加盐酸，比较经济；操作中机械损失少；烟气量小；适合于多种原料的电解阳极泥	盐酸浸出会导致银转化为极难溶的氯化银，使银的回收更加困难；同时有六价碲存在时可氧化盐酸释放出氯气，氯气溶解阳极泥中的金，使后续碲和金的分离困难	工业生产中不推荐此工艺
$2Cu+O_2=2CuO$ $Te+O_2=TeO_2$ $2CuSe+3O_2=2CuO+2SeO_2$ $Cu_2Te+2O_2=2CuO+TeO_2$	硒的回收率高，能有效实现碲和硒的分离	生产周期较长，能耗较高	

附表 1-7　国内碲湿法冶金浸出

序号	工艺名称	工艺流程或技术关键	主要反应
1	碱性氧化加压浸出法	在碱性条件下，通过提高体系反应温度和氧分压，使物料中碲完全氧化为难溶的碲酸钠，过滤，实现硒碲分离，然后利用稀硫酸浸出得到碲酸后回收碲	$4NaOH+2Cu_2Te+5O_2 = 2Na_2TeO_4 \downarrow +4CuO+2H_2O$ $2NaOH+Ag_2Te+2O_2 = Na_2TeO_4 \downarrow +Ag_2O+H_2O$ $4NaOH+PbTe+2O_2 = Na_2TeO_4 \downarrow +Na_2PbO_2+H_2O$ $4NaOH+2Cu_2Se+4O_2 = 2Na_2SeO_3+4CuO+2H_2O$ $4NaOH+2Cu_2Se+5O_2=2Na_2SeO_4+4CuO+2H_2O$
2	氧化酸浸法	铜阳极泥硫酸预先脱除可溶性铜，再在酸性条件下氧化和酸性液浸出，碲进入溶液	
3	氯化法浸出	使物料中能形成可溶性氯化物的所有组分都进入溶液中而成为复杂的混合氯化物溶液	$Ag_2Se+3Cl_2=2AgCl+SeCl_4$ $Cu_2Te+4Cl_2=2CuCl_2+TeCl_4$ $SeCl_4+3H_2O=H_2SeO_3+4HCl$ $TeCl_4+3H_2O=H_2TeO_3+4HCl$
4	溶剂萃取法	在一定条件下利用不同萃取剂与溶液中碲离子形成配合物进入有机相，其他元素少量或不被萃取，实现碲的分离与富集	采用中性萃取剂和含氮类萃取剂，还有硫醇、醇类以及环烷酸等萃取剂
5	液膜分离法	分离过程和溶剂萃取原理，用离子缔合原理萃取元素	
6	吸附法	利用活性物质与溶液中碲发生作用，如物理吸附、化学共沉淀、化学还原后吸附等，使碲沉积在活性物质中，实现碲的富集	

工艺对比

工艺特点	工艺不足	成熟程度
腐蚀性小，无挥发性硒损失，不需要清洗或气体洗涤工序，可使硒与碲分离	氧气和氢氧化钠消耗量较大	有工业应用
减少了焙烧工序、缩短了工艺流程和生产周期，优先除铜有利铜和碲的分离，同时尽可能避免了贵金属的分散，有利于碲和贵金属的回收	试剂消耗大，硒碲分离效果较差，所得碲纯度不高，氯化钠腐蚀严重，在操作中会有 Cl_2 产生	目前未见工业应用报道
对含碲物料适应性强，碲浸出率高、操作简单、反应速度快、便于控制	氯气具有毒性和强烈腐蚀性，导致操作环境差	大冶公司应用
节能，减少环境污染		无应用
选择性相当高，高效、快速、节能		在工业上还未推广
能有效提取低浓度的碲，具有高效性、清洁性	处理量较小	工业化生产较困难

《中国战略性新兴产业研究与发展》一期书目

《中国战略性新兴产业研究与发展·轴承》

《中国战略性新兴产业研究与发展·新能源汽车》

《中国战略性新兴产业研究与发展·生物质能》

《中国战略性新兴产业研究与发展·齿轮》

《中国战略性新兴产业研究与发展·太阳能》

《中国战略性新兴产业研究与发展·风能》

《中国战略性新兴产业研究与发展·工程机械》

《中国战略性新兴产业研究与发展·轨道交通》

《中国战略性新兴产业研究与发展·农业机械》

《中国战略性新兴产业研究与发展·数控机床》

《中国战略性新兴产业研究与发展·水电设备》

《中国战略性新兴产业研究与发展·智能电网》

《中国战略性新兴产业研究与发展》二期书目

《中国战略性新兴产业研究与发展·功能材料》

《中国战略性新兴产业研究与发展·塑木复合材料》

《中国战略性新兴产业研究与发展·非常规油气》

《中国战略性新兴产业研究与发展·模具》

《中国战略性新兴产业研究与发展·内燃机》

《中国战略性新兴产业研究与发展·塑料机械》

《中国战略性新兴产业研究与发展·物流仓储装备》

《中国战略性新兴产业研究与发展·紧固件》

《中国战略性新兴产业研究与发展·制冷空调》

《中国战略性新兴产业研究与发展·智能制造装备》

《中国战略性新兴产业研究与发展·中压开关》

《中国战略性新兴产业研究与发展·物联网》

《中国战略性新兴产业研究与发展·工业网络信息安全》

总 策 划　王文斌

封面设计　德浩设计工作室

易览网

中国战略性新兴产业研究与发展

功能材料

地址：北京百万庄大街22号 邮编：100037 电话 社服务中心：(010) 88361066 销售一部：(010) 68326294 销售二部：(010) 88379649 读者热线：(010) 68326643
网络 教材网：http://www.cmpedu.com 机工官网：http://www.cmpbook.com 机工官博：http://weibo.com/cmp1952

ISBN 978-7-111-42594-6

定 价：150.00元